8º Jornadas ITEE 2025


8° Jornadas
U.N.L.P.
ITEE 2025

Libro de trabajos de las VIII Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza-Facultad de Ingeniería-UNLP / Ernesto Acerbo ... [et al.] ; Compilación de Lucrecia Poteca ; Coordinación general de Liliana M. Gassa ; Ilustrado por Lucrecia Poteca. - 1a ed compendiada. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2025.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-2565-7

1. Proyectos de Investigación. 2. Enseñanza. I. Acerbo, Ernesto II. Poteca, Lucrecia, comp. III. Gassa, Liliana M., coord. IV. Poteca, Lucrecia, ilus.
CDD 001.4

ISBN 978-950-34-2565-7

Trabajos completos - 2025

Secretaría de Investigación y Transferencia
Facultad de Ingeniería - UNLP.

Ing. Liliana M. Gassa
Secretaria de Investigación y Transferencia

Mg. Ing. Gustavo Ariel Barbera
Prosecretario de Investigación y Transferencia

Lic. Gabriela Caorsi
Directora de Investigación y Transferencia

Lic. Leandro Grasso
Asistente

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Dr. Ing. Marcos Daniel Actis
Decano

Ing. Patricia Arnera
Vicedecana

Mag. Ing. Andrés Martínez del Pezzo
Secretario Académico

Esp. C. C. Rossana Di Domenicantonio
Secretaria Articulación Educativa y Seguimiento Académico

Ing. Liliana Mabel Gassa
Secretaria de Investigación y Transferencia

Mg. Ing. Gustavo Ariel Barbera
Prosecretario de Investigación y Transferencia

Ing. Gustavo Saralegui
Secretario de Extensión

Mag. Ing. José Scaramutti
Secretario de Acreditación

Ing. Sergio Liscia
Secretario de Asuntos Internacionales

Mag. Nicolás Bardella
Secretario de Vinculación con el Medio

Dr. Ing. Fabricio Garelli
Secretario de Posgrado

Mag. Lic. Nicolás Bardella
Prosecretario de Posgrado

Sr. Christián Vercesi
Secretario de Asuntos Nodocentes

Ing. Martín Zuliani
Prosecretario de Asuntos Estudiantiles

ÍNDICE POR AUTOR

Haga click en la página para acceder al trabajo que desea.

Autor	Código
ACERBO, Ernesto	IA20
ACHA, Joaquín	IH8 IH9
ACTIS Marcos Daniel	IA20 G1
AGUIRRE, Mario	IE2
ALBERRO, José	IA9
ALMADA, Santiago	IE25
ALVAREZ, Cecilia	IM7
ALVAREZ, Fredy	IA7
ALVAREZ, Juan Martín	INMA2
ALVIRA, Fernando	IE7
ALZAMENDI, Rocío	IMA5
AMADO, Marcos	IM2
ANACLETO, Clara	IQ16
ANDERSON AZZANO, Jorge Luis	IE19 IE26
ANDRES, Silvina Cecilia	IQ12
ANGELACCIO, Carlos	IH2
ANGHEBEN, Enrique	IH1 IH5 IH8 IH9
ANGULO, Mauricio	IH3
ANTONELLI, Marcos	IE2
AQUIN, Manuel	G2
ARNERA, Patricia L.	IE24 IE25
AROCAS, Sergio M.	IM2 IM3
ARRESE IGOR, Félix M.	IC7
ARRIETA ZUCCALLI, María Belén	INMA1
ARRIZABALAGA, Gastón	IC3 IC8
ARROJO, Carlos D.	IE1 IM6
ARTURI, Tatiana Sonia	IQ5
AZPEITIA, Leticia Anahí	IMA1 IMA2
BACCHI, Federico A.	IA4
BANERA, Mauro	IQ15 IQ16
BARBARO, Katia	CB13 CB14
BARBERA, Gustavo	IE15
BARRETO, Guillermo	IQ9
BARRIOS, Leonardo A.	IE19
BARROS ABDALA, Luciana	IH11
BASTON, Candela	IQ15

BAYES, Agustina	CB18
BELLOTTI, Natalia	IQ18
BERON, Guillermina	IA3
BERRETTA INVERNIZZI, Georgina	IQ23
BERTARELLI, Bautista	IA26
BERTOLA, Nora	IQ5
BIANCHI, Ana Elisa	CB13 - CB14
BIANCHI, Guillermo J.	IH5 - IH6
BIANCHI, Gustavo Luis	INMA 1 - INMA 2 - INMA3
BILMES, Pablo	IMA3
BISSIO, J. Francisco	IC10 - IC11
BLASETTI, Nahuel	IMA1
BOLZAN, Agustín E.	IMA2
BONVICINI MENENDEZ, Pablo F.	IMA3 - IMA4
BRANNE, Julia	IH2 - IH4
BRAUN, Matías	IC6
BUFFARINI, Leandro	CB21
BUONO, Camila	IQ16 - IQ17
BURDET, Mariano	IA12
BYRNE, Christian	IQ8 - IQ14
CABARCOS, Leo	IA8
CALANDRA, María Valeria	CB5 - CB6 - IAg3
CALVO, Gabriela H.	IH2 - IH4
CAMINOS BAEZ, Martina	IA2
CAP, Lucía	CB9
CAPPELLETTI, Daniel A.	IP1
CAPPELLETTI, Marcelo A.	IE6 - IE7
CAPRA, Bernardino	IC13
CARAVELLI, Alejandro	IQ4 - IQ23
CARBAJAL, Valentín	IE24
CARVALHO RODRIGUES, Germán Elías	IH3
CASTAÑEDA, María Teresita	IE3
CASTELLANI, Lisandro A.	IM8
CASTELLO, María Emilia	IM7 - IM8
CATACORA, Valentín A.	IE23
CATELLANI, Agustín	IE20
CENTORBI, Guillermo	CB6
CERRUTI, Claudio	IQ8
CERVANTES FLORES, Diego	IE8
CHERTUDI, Iñaki	IA22
CHEVEZ, Pedro	IC12

CHISWELL, Pilar	IA7
CIAFARDINI, Juan P.	IE9
CIBEIRA, Natalia Paula	IP2
CIPOLLA MIGUENS, Rodrigo	CB20
CIPPONERI, Marcos	IH2 - IH4
COLOMBO, Renzo	IE25
CONSOLI LIZZI, Paula	IH8 - IH9 - IH10 - IH11 - IH12
CORIA HOFFMANN, Geraldine	IM2 - IM3
CORIMAYO, Cristian	IQ5
COSTA, Viviana	CB1 - CB2 - CB17 - CB18
COUSELO, Romina	IP2
COZZARIN, Ana Laura	IM1 - IM4 - IM5 - IM6
CRESPI, Gabriel	IP1 - IP3
CROSSATTO, Juan Emilio	IA17
CULCASI, J. Daniel	IMA5
CURELL, Carlos Federico	IA23 - IA24 - IA27
DAGUERRE, Lisandro	IC3
DAMELIO CAMPITELLI, Serena	IQ16
D'ANGELO, Manuel	IE24
D'ANGELO, Leiza	IH12 - IH13
D´ALESSANDRO, Oriana	IQ14
D'IORIO, Juan Ignacio	IA6 - IA12
DASILVA, Agostina	IQ16
DAY, Diego	IA16
DE BATTISTA, Hernán	IE16
DE LA CUADRA, Guadalupe	IMA4 IMA5
DE URRAZA, Alexis	IA5
DEFRANCO, Gabriel	IM9
DEL NEGRO, Andrés	IE16
DEL RIO PAULETTI, Catalina	IA9
DEL ROSARIO, Danilsso	IH5 - IH6
DELNERO, Juan S.	IA3 - IA11 - IA15 - IA22 - IA26
DESIRIO, Joaquín	IA23 - IA24 - IA27
DEVECE, Eugenio	CB1 - CB6 - CB17 - CB18 - CB20
DEYA, Cecilia	IQ14 - IQ15 - IQ16
DI BERNARDI, Carlos	IA18 - IA19
DI DOMENICANTONIO, Rossana	CB8 - CB16 - G1
DI MARCO, Josefina	IM7
DI PAOLANTONIO, Anyelen	CB6
DIAS, Ricardo	IE1

DIAZ, Pablo G.	IM7
DISALVO, Valentín	IA16
DOMENCH, Luisina	IC4 - IC5
DONATI, Javier	IA26 - IA27
DUFFO, Gustavo S.	IC2
ECHAPRESTO GARAY, Iban	IA22
ECHARRI, Juan Manuel	IMA3 - IMA4 - IMA5
ECHEVERRIA, Gustavo Alberto	CB13 - CB14
ELGUETA GARNICA, Marcos D.	IM7
ESCALONA BARRIONUEVO, Alfredo	IP3
ESPIL NOSA, Francisco H.	IH5 - IH6
EVANGELISTA, Carolina	E21
FANELLI, Malena	IE25
FAUT, Rogelio	IA19
FELOY, Lucas E.	IM4 - IM5 - IM6
FERNANDEZ CORAZZA, Mariano	IE14
FERNANDEZ LOBO, Gonzalo M. J.	CB19 - CB20
FERRARESI CUROTTO, Verónica	CB13 - CB14
FERRARI, Flavio A.	IE8 - IE14
FERREYRA, Aldana	IA9
FERRO OROZCO, Micaela	IQ23
FIGUEROA, Fernando	IA16 - IA21
FIORE, Maxime	IA6
FRACASSI, Luciana	IC3 - IC8
FRENE, Horacio Martín	IE1 - IM6
FRIGOLI, Elisa	IC8 - IC13
FUENTES, M. Ezequiel	IA28
FUERTES, Laura	IM9
GALACHE, Ramón	IM2 - IM7
GALLO, Marina	CB18
GAMARRA, Ariel Nicolás	IA11 - IA15 - IA16 - IA18
GARAVENTTA, Guillermo	IA20
GARAVENTTA PASCUAL, Santiago	IA20
GARCIA, Pablo	IE2 - IE14
GARCIA COLLI, Germán	IQ6 - IQ22
GARELLI, Fabricio	IE10 - IE12
GARLATTI, Roberto	IA8
GASTALDI, Hernán	CB20
GATTI, Martín N.	IQ7 - IQ17
GAUNA, Matías Roberto	IC1
GAVINO, Sergio	IM8 - IM9

GERVASI, Claudio Alfredo	IMA1 - IMA2
GIACCIO, Graciela	IC9
GIANNI, Esteban	IM7
GIL REBAZA, Arles	IE7
GIRARDI, Joaquín	IMA4
GOJON, Romain	IA6
GOLZI, María Eugenia	IQ12
GOMEZ, Enzo D.	IC2
GONZALEZ, Sergio A.	IE22
GONZALEZ ALLONCA, Juan Cruz	IM5
GONZALEZ MARINO, Gerónimo	IE10
GOÑI, Sandro M.	IQ10
GRASELLI, Valentín M.	IE18
GRIGORIEVA, Viktoria Yu	CB13 - CB14
GRILAUSKAS, Zoe	IE25
GROSS, Patricio	IE9
GUAITA, Lucas	IA10
GUBKIEN, Benjamín A	IE18
GÜIDA, Jorge Alberto	CB13 - CB14
GUERRA LOPEZ, José Rodolfo	CB13 - CB14
GUERRERO, Adrián	IC13
GUERRERO, Federico N.	IE2
GULICH, Damián	CB9 - CB10 - CB11 - CB12
GUTIERREZ, Fernando	IM10
GUTIERREZ, Lautaro	IM3
HABERMAN, Marcelo	IE2
HAMID, Guillermo Daniel	IA25
HANISCH, Elián	IE11
HERLEIN, Matías E.	IE1
HERNANDEZ, Marcos	IM3
HERRERA, Matías	IA4 - IA28
HOURS, Francisco	IC9 - IC13
IBAÑEZ, Bernabé	IE12
INTHAMOUSSOU, Fernando	IE3 - IE6 - IE12 - IE16
IRIGOYEN, Agustín	IA17
ISSOURIBEHERE, Fernando	IE15
JUAREZ, José	IE13
JUNCIEL, Luis	CB14
JURADO, Julián E.	IC6 - IC7
JUSTO, Claudio Eduardo	CB5 - IAg1 - IAg3

KANG, Kyung Won	IMA1 - IMA4
KEEGAN, Sergio	IQ21 - IQ22
KESSLER, Tomás	IA27
KOERNER, Manuel	IH7
KOHAN, Juliana	IMA4 - IMA5
LACOSTE, Juan L.	IM4 - IM5 - IM6
LACUNZA, Esteban	IH6 - IH8 - IH9 - IH10 - IH11
LANGONI, Laura	CB7 - CB8
LARSEN, Diego Omar	IC3 - IC8 - IC13
LAVECHIA, Mariano	IE2
LEIBOVICH, Pablo	IE15
LEMOS BARBOZA, Adriana Lucila	IMA1
LEON GUACHETA, Neyder	IA20 - IA22 - IA26
LHUILLIER, Ernestina	IA26
LISCIA, Sergio O.	IH7 - IH11 - IH12 - IH13
LLORENTE, Carlos	IMA1 - IMA3
LOBO, Cintia Cecilia	IQ4 - IQ5
LODEIRO, Aníbal Roberto	CB15
LOMBARDOZZO, Simón M.	IE20
LOPEZ, Guillermo	IQ18
LOPEZ, Mariano	IC13
LOPEZ LA VALLE, Ramón	IE20
LOPEZ VAN DER HORST, Juliana	IQ13 - IQ19
LOPRESTI, Laura	IM8 - IM9
LORENTE, Hugo	IE13
LORENZO, Gabriel	IQ6 - IQ11 - IQ12
LUCINO, Cecilia	IH3
LUNARDELLI, Damián	IA10
LUPORI, Vanesa Tamara	IC1
MAFFIA, Ernesto G.	IM4 - IM5 - IM6
MAISTRUARENA, Adelina	IH9
MAMPAZO, Elisa	IC3 - IC8
MANCEÑIDO, Andrés R.	CB16
MANCINI, Claus N.	IE18
MANCINI, Juan Manuel	IA25
MANRIQUE, Lautaro	IA16
MANSILLA, Nicolás	IM7
MANTELLI, Pablo	IA3
MANTZ, Ricardo	IE22
MARAÑON DI LEO, Julio	IA11 - IA22 - IA27
MARCHETTI, Lucas	IQ11 - IQ12

MARIANI, Néstor Javier	IM11 - IQ9 - IQ21 - IQ22
MARLETTA, Valentina	IA4
MARRANGHELLI, Ezequiel	IE20
MARRANGHELLO, Tomás	IA21
MARTIARENA, Juan Francisco	G2
MARTIARENA, Tomás	IM2
MARTINEZ, Angel Joaquín	IMA3 - IMA4 - IP3
MARTINEZ, Mariano Alvaro	IA2
MARTINEZ, Ricardo	IC13
MARTINEZ DEL PEZZO, Andrés	IA21
MASCIONI, Gastón	IA9
MASSA, Angela	IQ16
MASSOLO, Miranda	IM7
MASSON RODRIGUEZ, Julián	IH11
MATTIOLI, Nicolás	IQ10
MAYER, H Gastón	IE15
MAYOCCHI, Karina	IMA1
MEALLA, Elías	IE8
MEDINA,Ingrid Y.	CB12
MELGAREJO, Augusto Argentino	CB15
MENDOZA,Luis J.	CB12
MOJICA, Ruth	CB12
MONETTI, Diego	IC2
MORA, Jerónimo	IM6
MORALES, Diego	CB20
MORAN FABRA, Rubén	IE20
MORE, Jerónimo	IE18
MOREA, Francisco	IC3
MOREYRA, Nicolás	CB20
MUÑOZ, Pablo	IE22
MURISENGO, Walter	IAg2
MURUCHI ARISPE, Eduardo Esteban	IQ18
NADAL MORA, Vicente	IA6 - IA8
NAGAI, Nadia Florencia	IQ12
NASTTA, Hernán A.	IE1
NUÑEZ, Francisco	IE20
NUÑEZ, Sebastián	IE3
OLIVA, Matías	IE2
OLIVERA, Lucas M,	IE6
OLIVERA, Daniela F.	IQ10
ORJUELA PALACIO, Juliana	IQ1 - IQ2 - IQ3

ORSETTI, Santiago	IQ7
OYARZUN LARREA, César	IA23 - IA24
PALMIERI, Julieta	IM5
PAOLI, Leandro Ignacio	IA27
PAREDI, Jorge	IAg2 - IAg5
PASQUEVICH, Facundo Daniel	IA7 - IA13 - IA17 - IA25 - IA27
PAULETICH, Fabiana	CB2
PAUS, Pablo	IAg4 - IE14
PENDON, Manuela	IP2
PENILLAS, Juan Manuel	IM10 - IM11
PEREZ, Federico M.	IQ7 - IQ17
PESARINI, Alejandro	IA18 - IA19
PEZZOTTI, Santiago	IA8 - IA12
PIECHOCKI, Joaquín	IA8 - IA12
PIELLA, Juan Manuel	IA9
PINO, Neuvis Alejandro	IQ11
PINZON, Carlos	IE7
PITRELLI, Sergio	IA18 - IA19
POMPEO, Francisco	IQ7 - IQ13 - IQ17 - IQ19 - IQ20
PORCEL DE PERALTA, Benjamín	CB1 - CB6 - CB18 - CB19
PULESTON, Pablo F.	IE18 - IE19 - E21 - IE22 - IE26
QUISPE GUTIERREZ, Liliana Teresa	IAg5
RAIMUNDI, Serafín	IA16
RAMIREZ, Bárbara Sofía	CB15
RAMOS, Marcelo Alberto	CB13 - CB14
RAU, Julietta	CB13 - CB14
RE, Carola	G1
REVERTER, Ferran	IE23
REYES MENDOZA, Gian	IH13
RIMOLDI, Claudio	IA16 - IA20
RINGEGNI, Pablo	IA9
RIVA, Diego A.	IE21
ROCCO, Claudio G.	IC1 - IC6 - IC7 - IC10 - IC11 - IC13
RODRIGUEZ, Emiliano	IM3
RODRIGUEZ, Franco	CB5 - IAg3
RODRIGUEZ, Santiago	IE20
RODRIGUEZ PRESA, María J.	IMA2
RODRIGUEZ SARTORI Juliana	IA2
ROIG, Alejandro Ramón	CB15
ROMANO, Roberto José	IAg1 - IAg2 - IAg4 - IAg5
RONDAN, P. Valentín	IM8
ROSENDO, Juan Luis	IE10

RUIZ DIAZ, Fernando	IM4 - IM5 - IM6 - IM7 - IM8
RUSSO MARTINEZ, Santiago	IA2
SAA	IA22
SAAVEDRA, Marcos D.	IE12
SAGER, Gerardo	IE13
SAGESSE, Arián	IE17
SALTOS SANCHEZ, Harry	IE7
SALVIOLI, Mónica	IH2 - IH4
SANCHEZ, Facundo	G2
SANCHEZ, Manuel	IQ16
SANCHEZ, Marcelo A.	IM8
SANCHEZ, María Belén	IMA5
SANCHEZ, Valentina	IA14
SANCHEZ BETTIOL, Martín	IA18
SANSOTTA, Juliana	IA9
SANTISO, Javier	IA10
SANTORI, Gerardo F.	IQ7 - IQ17
SANTOS, María Victoria	IQ3
SARALEGUI, Gustavo D.	IM4 - IM7
SARAVI GAMBOA, Bautista	IA9
SARMIENTO, Federico	IA22
SCARABINO, Ana Elena	IA4 - IA5
SCARAMUTTI, José C.	IE1
SCRIBANO VERA, Facundo	IE24
SEJAS, Juan	CB17
SEIJAS, Carlos	INMA3
SEMENTO, Tulio	CB7
SERROELS, Florencia	G2
SIERRA SOSA, Daniel	CB11
SMIDT, Javier A.	IE17
SPERONI, Lucas	IM9
SPINELLI, Enrique	IE2 - IE14 - IE23
STELLA, Joaquín	IE21
SUAREZ, Felipe J.	IQ9
TACHI, Martín	IA15
TAULAMET, María José	IQ21 - IQ22
TEBALDI, Myrian	CB9 - CB11 - CB12 - CB21
TITTONEL, Marcelo	IP3
TOMPKINS PALMIER, Victoria	IE24
TORRES, Alberto José F.	IE18
TORRES, María Gimena	IQ6
TORRES ZANARDI, Juan Manuel	IA4 - IA5

TORRIJOS, María Celeste	IC9
TORROBA, Patricia L.	CB1 - CB3 - CB4 - CB19
TOSCANI Lucía M	IQ20
TOVIO, Daniel Oscar	IM4 - IM5
TRABUCCO, Franco	IA21
TRIPOLI, Ma. de las Mercedes	CB2 - CB3 - CB4
TSUNODA, Sofía	IMA2
UBERTINO Mauro	CB13 - CB14
UGUET, Martín Ezequiel	IC8
URDANGARIN, Belén	IA16
URIONA, Hugo	CB17
URRUTIPI, Facundo	IMA3 - IMA4 - IMA5
VAGGE, Mariana S.	CB8
VALENCIA AGUIRRE, Brandom Javier	IA13
VALENCIAGA, Fernando	IE3
VARVASINO, Juan Francisco	IH11
VATH, Brenda	IH7 - IH13
VASQUEZ, Benerice	IQ18
VAZQUEZ, Camila	IQ4
VAZQUEZ, Damián R.	IC2
VEGA, Silvio	INMA3
VERDINA, Matías	CB20
VERNIERI, Julieta	IE9
VIDELA, Fabián	CB19
VILLA, Edgardo Ignacio	IC4 - IC5 - IC6 - IC7 - IC10 - IC11
VILLAFLOR, Tomás Ignacio	IH1
VILLAR, Juan Ignacio	IA14
VILLAMIZAR AMADO, Astrid	CB9
VIVAS, Juan Carlos	IC13
VIVAS ESCOBAR, Kevin	IC10 - IC11
VOLPE GIANGIORDANO, Ma. Florencia	IQ19 - IQ20
WALL, Carlos A.	IE24 - IE25
WEIMER, Iván	IQ8
WILLIAMS, Eduardo Ariel	IC3 - IC13 - IP2
YACULLO, Juan	IA26
YBARRA, Graciela	IMA5
ZAPPETTINI. Mateo	IE26
ZAPPITELLI, María Paula	IC7
ZARITZKY, Noemí E.	IQ1 - IQ2 - IQ3 - IQ5 - IQ23



SURA**AGRIMENSURA**AGRI

EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN HORIZONTAL EMPLEANDO LA TÉCNICA PPP

Romano, Roberto José – Justo, Claudio Eduardo

Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería-UNLP
Calle 1 y 47 - La Plata
jose.romano@ing.unlp.edu.ar

Introducción

En este trabajo se analizaron los resultados de mediciones GNSS procesadas con la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) utilizando el servicio en línea PPP-Ar del Instituto Geográfico Nacional (IGN). El objetivo fue evaluar la incertidumbre de esta técnica bajo las condiciones típicas de trabajo en Agrimensura y medir su rendimiento en función del tiempo de observación.
El estudio se basó en observaciones realizadas durante 50 sesiones, con frecuencia semanal, a lo largo de 2022 y 2023. Se utilizó un receptor Kolida K9TX, que se posicionó sobre un punto de referencia del Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. Cada sesión consistió en la colocación de la antena y cuatro horas continuas de observación. Posteriormente, se generaron archivos adicionales con períodos de dos y una hora, manteniendo la misma época de inicio. Estos archivos fueron enviados al servicio PPP-Ar del IGN para obtener soluciones en el marco de referencia oficial POSGAR07 (IGN, 2009). Así, para cada sesión se obtuvieron tres soluciones con diferentes duraciones.
Antes de su análisis, las soluciones planimétricas obtenidas se proyectaron en la faja 6 Gauss-Krüger. Este trabajo presenta los análisis en planimetría (coordenadas NORTE y ESTE), incluyendo la precisión en función de la duración de las mediciones, la presencia de sesgos y la comparación con técnicas diferenciales. Además, se evaluó la relación entre el tiempo de observación y la precisión alcanzada.
Para evaluar la dispersión, se compararon los resultados con un valor de referencia obtenido mediante una técnica GNSS diferencial, basada en observaciones independientes. Dado que esta técnica se analiza con el fin de emplearse en trabajos de Agrimensura, se definió un entorno de control empírico a partir de un círculo de 15 cm de diámetro, equivalente al tamaño de un poste de alambrado, que comúnmente se usa para definir los límites de inmuebles rurales. Posteriormente, se analizó el comportamiento de las observaciones en relación con este entorno definido, determinando las frecuencias relativas correspondientes según la duración de las observaciones.
Los resultados mostraron que, con observaciones de 4 horas, las diferencias fueron en su gran mayoría inferiores a 5 cm, mientras que con observaciones de 2 horas la diferencia promedio fue de 10 cm. En las observaciones de 1 hora, se registraron dos diferencias superiores a 15 cm. Estos resultados indican que la técnica PPP es confiable dentro de los márgenes observados y puede ser utilizada como alternativa cuando no sea posible aplicar técnicas diferenciales o cuando un profesional lo considere adecuado. Los resultados obtenidos permiten predecir, con un nivel de confianza determinado, los resultados de esta técnica en mediciones equivalentes.

Parte experimental

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) permite obtener posiciones sobre la superficie terrestre mediante diferentes técnicas y con diversos niveles de precisión. En general, para trabajos de Agrimensura, las precisiones requeridas demandan métodos diferenciales, que dan la incertidumbre relativa a un punto tomado de control implicando la medición simultánea con dos receptores. Los métodos absolutos o

autónomos, que emplean un solo receptor, presentan incertidumbres del orden de varios metros en cada coordenada, respecto del marco global, lo que los hace poco útiles para la Agrimensura en general. La técnica de medición mediante el sistema GNSS denominada Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), es del tipo absoluto pero logra alcanzar precisiones del orden de algunos centímetros, según se trate de planimetría o altimetría, y dependiendo del tiempo y las condiciones de observación. De manera resumida, la técnica de medición PPP utiliza las observaciones realizadas con un receptor GNSS, junto con las efemérides precisas de las órbitas y de los relojes de esos satélites. Estos datos son procesados mediante un algoritmo específico para calcular la posición tridimensional del receptor GNSS con una precisión alta, dependiendo de la calidad de los datos y otros factores.
El Servicio Internacional GNSS (IGS) genera y publica semanalmente archivos de órbitas satelitales, correcciones a los relojes de los satélites y parámetros orientación terrestre que son utilizados en el procesamiento PPP. Adicionalmente a los datos señalados, PPP requiere además de modelos de carga oceánica, modelos del estado de la tropósfera (temperatura y humedad) y datos de calibración absoluta de antenas de los satélites y receptores (IGN, 2022). Esta técnica de procesamiento de datos GNSS utiliza los observables de código y fase de la combinación libre de ionósfera de las portadoras L1 y L2 (L3) para obtener estimaciones de las coordenadas del receptor GNSS, el estado del reloj del receptor, el retardo troposférico y las ambigüedades de fase (Kouba, 2001).
En julio de 2022, el IGN lanzó un nuevo servicio de procesamiento en línea de PPP para los usuarios. A diferencia de otros servicios previamente disponibles, el servicio del IGN ofrece resultados en el marco de referencia oficial POSGAR 07. Esto implica que se utilice en las coordenadas resultantes el modelo de predicción de trayectorias de la República Argentina VEL-Ar (Modelo de velocidades Argentina). Logrando la transformación temporal de coordenadas al marco de referencia oficial POSGAR07 para la época 2006.632. Esto representa una ventaja para los usuarios del servicio, ya que de lo contrario deberían encargarse de aplicar estas transformaciones.

Obtención de datos

Se realizaron observaciones con un receptor GNSS en 50 días distintos, a lo largo de un año (2022-2023), manteniendo una frecuencia semanal y un tiempo de observación de cuatro horas por sesión. El receptor utilizado fue un Kolida K9TX, donado por el Consejo Profesional de Agrimensura (CPA) de la Provincia de Buenos Aires en 2018 (Figura 1).



Figura 1: Receptor GNSS Kolida K9TX estacionado sobre el punto AGRIM.

El punto de observación, denominado AGRIM, se materializó mediante un clavo de acero en la terraza del edificio del Departamento de Agrimensura (FI-UNLP). En cada sesión, el equipo

se estacionó sobre la marca de aproximadamente 5 mm de diámetro, asegurando el centrado con una plomada óptica de la base nivelante.

El emplazamiento del punto no presentaba condiciones ideales para este tipo de mediciones, ya que la presencia de muros y árboles cercanos producen errores por multicamino y bloqueo de señales respectivamente. Sin embargo, se eligió por su accesibilidad constante y seguridad para el equipo durante las cuatro horas de observación. La altura del receptor se midió con cinta métrica en tres puntos diferentes de la banda de referencia de alturas del instrumento. A partir del archivo de observación original de cuatro horas, se generaron tres archivos adicionales: primera hora, primeras dos horas y segundas dos horas, manteniendo la misma época de inicio en cada caso.

Procesamiento PPP

Para cada una de las 50 observaciones, se enviaron al servicio PPP del IGN los cuatro archivos obtenidos, una vez transcurrido el tiempo necesario para obtener una solución precisa (IGN, 2022). El acceso a este servicio requiere la creación de un usuario y clave, tras lo cual se debe completar un formulario con las características del receptor utilizado y adjuntar el archivo de observación en formato RINEX. En la Figura 2 se muestra una parte del reporte generado por el servicio PPP-Ar correspondiente a una de las sesiones. Los resultados extraídos de este reporte incluyen las coordenadas geodésicas (latitud y longitud) expresadas en el marco de referencia oficial POSGAR07. En una etapa posterior del trabajo, estas coordenadas se transformaron a planas (Norte y Este).Una característica importante de los reportes emitidos por el servicio PPP-Ar es su trazabilidad, garantizada por un código QR que permite descargar el reporte en formato PDF directamente desde los servidores del IGN.



Figura 2: Parte del reporte devuelto por el servicio PPP-Ar con resultados de una observación. El código QR de la derecha permite acceder al reporte completo.

Tolerancia para los errores

Se adoptó un entorno de control planimétrico representado por un círculo de 30 cm de diámetro, como criterio empírico o funcional de error tolerable para estas mediciones. Esta magnitud se estableció en base a la normativa de la Provincia de Buenos Aires para la ejecución de vinculaciones en trabajos de mensura que requieran vinculación GNSS a la red GEOBA, según lo establecido en la Disposición 384/2009 DG:
"Artículo 6º. Establecer en treinta (30) cm. la tolerancia máxima admisible en cada una de las coordenadas (Latitud, Longitud) del vértice de la parcela a mensurar y/o de la base de vinculación" (DG, 2009).
Esta disposición indica que los tiempos de medición deben permitir obtener tres soluciones para cada punto: una procesando todo el intervalo de medición y otras dos dividiendo dicho intervalo por la mitad. Las tres soluciones deben estar comprendidas dentro de la tolerancia establecida de 30 cm en cada coordenada. Si bien esta tolerancia establece un control relativo de las observaciones para determinar su coherencia, no contempla un control absoluto sobre la posición resultante en el marco de referencia de trabajo. No obstante, ante la falta de otra reglamentación oficial, se adopta el valor de 30 cm como magnitud de referencia.

Interpretación práctica del entorno de control.

Este estudio analiza la capacidad del método PPP-Ar para su aplicación en trabajos de Agrimensura en zonas rurales o semirrurales. En estos entornos, los límites de propiedad suelen estar materializados por postes esquineros de madera dura. La proyección en planta de estos elementos es, en muchos casos, comparable al círculo de 30 cm de diámetro adoptado como tolerancia. Por lo tanto, este umbral permite evaluar si la exactitud del método es adecuada para definir la posición de esos elementos en el marco de referencia POSGAR07.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos de cada procesamiento son las posiciones de los puntos en el marco de referencia oficial de la Argentina POSGAR07. Estas coordenadas geodésicas se transforman a coordenadas planas Norte (N) y Este (E) mediante la proyección Gauss-Krüger, trabajando en faja 6. Para evaluar la exactitud del método aplicado se analizó la dispersión de las 50 observaciones respecto a valor de referencia obtenido mediante una técnica GNSS diferencial. Este valor de referencia, correspondiente al punto AGRIM, se determinó a partir de mediciones independientes a las 50 analizadas.
Las coordenadas de referencia del punto AGRIM son: N= 6137418,123 E= 6413772,372.

Tabla 1: Comparación de resultados.

Duración (horas)	Precisión de las mediciones		Variabilidad de las coordenadas			
	Mediciones dentro del radio de 15 cm (%)	RMSE 2D (m)	Desviación estándar		Rango intercuartil	
			N (m)	E (m)	N (m)	E (m)
1	96.00	0.06	0.013	0.059	0.015	0.047
2*	100.00	0.03	0.008	0.029	0.009	0.032
2**	100.00	0.04	0.015	0.032	0.012	0.028
4	100.00	0.02	0.007	0.021	0.006	0.022

En la tabla 1 se han volcado los parámetros que caracterizan la exactitud de los resultados, diferenciando por la duración de los archivos procesados: 1 hora, 2 horas (2* 1ra mitad, 2** 2da mitad) y 4 horas.
En la figura 3 se expresa la dispersión de las 50 observaciones para 1 hora de duración (izquierda) y para las 2 horas de la primera mitad (derecha). Mientras que en la figura 4 se representan las gráficas para las observaciones de las 2 horas de la 2da mitad (izquierda) y para las observaciones de 4 horas (derecha).
En estas figuras se indica con un punto en color verde la posición de referencia representada por el punto AGRIM. Además, este punto, es el centro de un círculo de radio 15 cm, también en color verde, que se utiliza como entorno de control.
Analizando las figuras 3 y 4 y a partir de los valores de la tabla 1. Para las observaciones de 1 hora el 96% de los casos quedan dentro del entorno de control adoptado. Para las observaciones de 2 y 4 horas el 100% de los casos quedan comprendidos en ese entorno de control.
Se observa que la dispersión de los resultadas en considerablemente mayor para la coordenada Este que para la coordenada Norte. Esta particularidad fue encontrada

únicamente en el servicio PPP-AR. Para los mismos puntos, no se aprecia este efecto al analizar los resultados obtenidos con otros servicios PPP, como por ejemplo CSRS-PPP de Canadá. Este efecto es causado por el empleo del modelo de velocidades VEL-Ar, debido a que este presenta una precisión más baja en la componente Este comparada con la Norte (IGN, 2022). A pesar de esta particularidad, los resultados encontrados, quedan comprendido dentro del entorno de control.

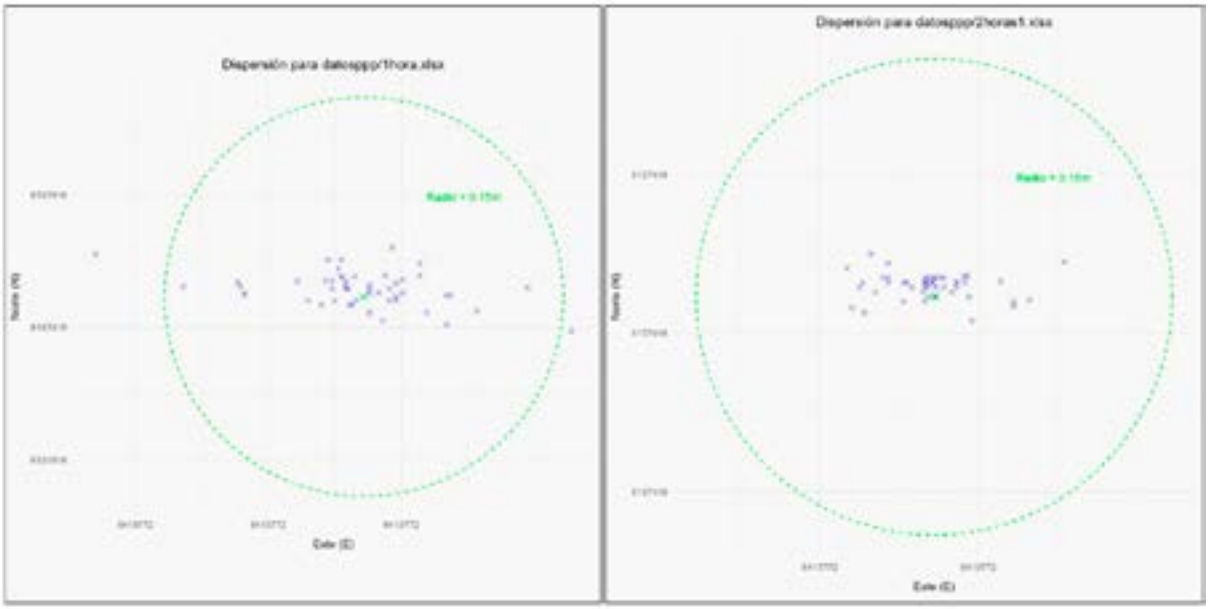


Figura 3: Distribución de mediciones respecto al punto AGRIM. Izquierda de 1 hora. Derecha de 2 horas (1ra mitad).

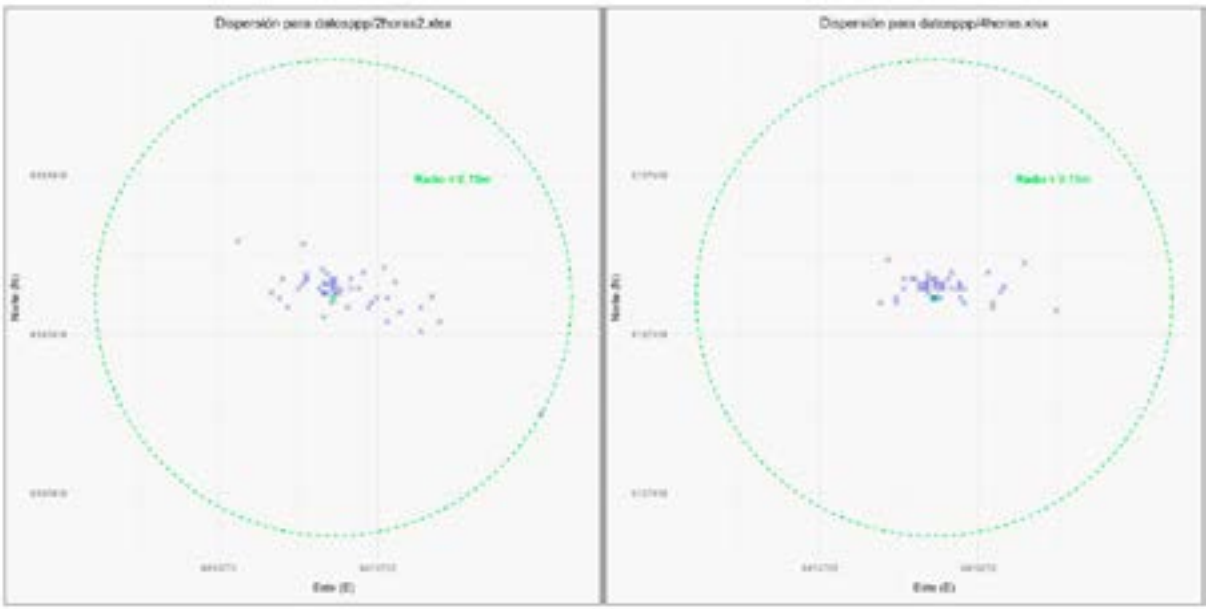


Figura 4: Distribución de mediciones respecto al punto AGRIM. Izquierda de 2 horas (2da mitad). Derecha de 4 horas.

La mayor exactitud fue alcanzada en las observaciones completas de 4 horas, lo cual es previsible para esta metodología de trabajo. La comparación entre la 1ra y la 2da mitad de la observación completa, es decir, las primeras 2 horas con las 2das 2 horas, no evidencia la presencia de sesgos. Los parámetros que caracterizan la dispersión de las mediciones, para ambos grupos, pueden considerarse equivalentes. Por otro lado, la dispersión de las

observaciones se reduce considerablemente al aumentar el tiempo de medición de 1 a 2 horas, aunque esta mejora no es tan marcada al extender la duración de 2 a 4 horas. Esto indica que un incremento en el tiempo de observación no siempre se traduce en una mejora proporcional en la exactitud de los resultados.

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos es posible enunciar las siguientes conclusiones:

- El análisis general de los resultados muestra que incluso las observaciones de 1 hora cumplen mayoritariamente con la tolerancia adoptada. Considerando además que las condiciones de medición no fueron las ideales.
- El método PPP-Ar puede utilizarse como alternativa en situaciones donde no sea posible aplicar técnicas diferenciales debido a la falta o falla de estaciones GNSS permanentes.
- Atendiendo a la exactitud de estos resultados, PPP-Ar puede utilizarse para verificar la precisión de otras técnicas GNSS, proporcionando una validación independiente de los resultados obtenidos mediante métodos diferenciales.
- La posibilidad de acceder a los reportes completos mediante un código QR garantiza la trazabilidad de los resultados, lo que representa un respaldo técnico tanto para los profesionales actuantes como para el comitente privado o institución estatal ante quien se presente el trabajo.
- En cuanto a los tiempos de medición, no se observa una reducción significativa en la dispersión de las mediciones al aumentar de 2 a 4 horas. Sin embargo, sí se aprecia una mejora en la exactitud de los resultados al comparar mediciones de 1 y 2 horas. Por lo tanto, se concluye que un tiempo de observación de 2 horas representa un equilibrio óptimo entre precisión y productividad.
- El posicionamiento PPP presenta en sus reportes, una incertidumbre relativa al procesamiento. En este trabajo se puede apreciar la incertidumbre de la posición respecto del marco de referencia POSGAR07.

Bibliografía

- Instituto Geográfico Nacional. (2009). *Adopción del Nuevo Marco de Referencia Geodésico Nacional*. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07
- Instituto Geográfico Nacional. (2022). *VEL-Ar: Modelo de velocidades argentinas*. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07
- Instituto Geográfico Nacional - Dirección de Geodesia. (2022). *Servicio PPP-Ar Posicionamiento Puntual Preciso de la República Argentina*. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ppp
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions, 5*(2), 12–28. https://doi.org/10.1007/PL00012884
- Natural Resources Canada. (n.d.). *CSRS-PPP*. https://webapp.csrs-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp-info.php?locale=en
- Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires. (2009). *Disposición 384-2009* (y sus modificaciones).
- Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires. (2009). *Disposición 384*.

PRÁCTICAS PROFESIONALES E INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS TOPOGRÁFICAS: RELEVAMIENTO PLANIALTIMÉTRICO EN LA FAU

Romano, Roberto José – Paredi, Jorge – Murisengo, Walter

Dpto. Agrimensura, FI-UNLP. Calle 1 y 47 - La Plata

jose.romano@ing.unlp.edu.ar

Introducción

En este trabajo se describen las actividades realizadas por docentes y estudiantes del Departamento de Agrimensura en el predio ocupado por la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

El trabajo surgió a partir de una solicitud de las autoridades de la FAU, quienes requerían datos georreferenciados sobre la ubicación y las alturas de los edificios y patios de su unidad académica. La información obtenida sería utilizada por el equipo del Programa de Gestión Integral Edilicia para desarrollar un BIM (Building Information Modeling) georreferenciado que gestione los recursos físicos de la facultad.

El objetivo principal de este proyecto fue que estudiantes avanzados de la carrera de Ingeniería en Agrimensura pudieran cumplir con esta solicitud, integrando técnicas topográficas adquiridas en los distintos cursos de la carrera, bajo la dirección y asesoramiento de los docentes. Este trabajo se llevó a cabo en múltiples etapas entre marzo y octubre de 2024. Los estudiantes participaron activamente en todas las tareas involucradas en el relevamiento, interactuando con alumnos y docentes de la FAU.

Para ejecutar el relevamiento, se utilizaron técnicas GNSS RTK (Berne-Valero, 2014), que permitieron georreferenciar los datos en el marco de referencia POSGAR 07 (IGN, 2009). Además, se realizó la vinculación altimétrica a la red de alturas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante nivelación geométrica. El levantamiento planialtimétrico de los puntos de interés se efectuó mediante taquimetría electrónica con estación total, y se tomaron mediciones puntuales y datos de control utilizando distanciómetros digitales de mano y cintas métricas.

Esta actividad brindó a estudiantes de 4to y 5to año de la carrera de Ingeniería en Agrimensura la oportunidad de involucrarse en situaciones de trabajo reales, enfrentando diversos desafíos y colaborando en equipos interdisciplinarios. Los alumnos participaron en la planificación del trabajo según requerimientos específicos, ejecutaron tareas dentro de un cronograma establecido y trabajaron a la par de estudiantes y profesionales de otras diciplinas. La posibilidad de interactuar con campos del conocimiento diferentes no solo enriqueció el proyecto, sino que también permitió que los estudiantes comprendieran la importancia de integrar diversas áreas en el desarrollo de soluciones complejas, como es el caso del sistema BIM aplicado a la FAU.

Participaron de esta actividad los estudiantes avanzados de la carrera de Ing. Agrimensor: Luciano Clérico, Sebastián Machado Nagore, Lucas Carretto, Nicolas Velozo y Marcelino Mondini.

Parte Experimental

Los trabajos topogeodésicos realizados constaron de las siguientes etapas:

- Generación de un ortomosaico (Santecchia, 2020) georreferenciado.
- Mediciones GNSS RTK para la vinculación planialtimétrica del levantamiento topográfico.
- Taquimetría electrónica con estación total para el levantamiento de los edificios y otros espacios.
- Mediciones complementarias con nivel de anteojo y distanciómetro de mano.

Estas etapas fueron planificadas y desarrolladas por el grupo de estudiantes que participaron en la actividad, bajo la coordinación de los docentes responsables del trabajo.

1- Generación de un Ortomosaico georreferenciado

El uso del ortomosaico en este trabajo tuvo como propósito contar con una representación detallada y actualizada de la zona a relevar. Aunque el relevamiento posterior se realizó con mayor precisión mediante técnicas de GNSS RTK y taquimetría electrónica, el ortomosaico permitió obtener una visión general de la superficie a estudiar, proporcionando una base visual sólida para las siguientes etapas del trabajo.

El ortomosaico se generó mediante un proceso de fotogrametría a partir de imágenes aéreas obtenidas con un dron DJI Phantom 4 Advanced del Departamento de Agrimensura.



Figura 1: Ortomosaico georreferenciado obtenido mediante el procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas obtenidas con un dron.

El procedimiento de trabajo durante esta etapa comprendió:

- Planificación del vuelo: Se programó un vuelo a 120 m de altura, con una duración aproximada de 11 minutos. Se establecieron una superposición frontal del 85% y lateral del 80%, utilizando un patrón de vuelo en cuadrícula. Bajo estas condiciones, se estimó un tamaño de píxel, a priori, de 3,4 cm.
- Medición de GCP (Ground Control Points): Se seleccionaron puntos de referencia preexistentes (marcas de pintura, esquinas de veredas, etc.), fácilmente reconocibles en las imágenes. Estos puntos fueron medidos con GNSS RTK, utilizando como referencia el punto denominado AGRIM ubicado en el Departamento de Agrimensura, vinculado a la red POSGAR 07.
- Ejecución del vuelo: Para esta tarea se eligió un día poco ventoso y sin nubosidad. El vuelo se desarrolló según lo planificado, obteniéndose 185 imágenes para su posterior procesamiento.
- Procesamiento fotogramétrico: Mediante las fotografías aéreas y los GCP medidos, se generó el ortomosaico georreferenciado (figura 1) con un tamaño de píxel de 3,65 cm. Como productos adicionales, se obtuvo una nube de puntos densa y un modelo digital de elevación (MDE).
- Control de resultados: Para la validación del ortomosaico, se emplearon puntos de control independientes (diferentes a los GCP utilizados en el proceso). Las diferencias observadas fueron inferiores al tamaño de píxel, lo que confirmó la precisión del producto generado.

2- Mediciones GNSS RTK

La técnica GNSS RTK permite la medición rápida y precisa de puntos del terreno y su vinculación a redes geodésicas. En este caso, fueron referidos a la red POSGAR 07, siguiendo la misma metodología aplicada previamente para la medición de los Puntos de Control GCP. Desde 2021, el Departamento de Agrimensura ha realizado múltiples mediciones GNSS sobre el punto AGRIM, lo que ha permitido determinar sus coordenadas con un alto grado de precisión. Este punto ha sido empleado como referencia en diversos trabajos topográficos realizados en el campus de la UNLP. El punto AGRIM está materializado mediante un clavo de acero y se encuentra ubicado en la terraza del Departamento de Agrimensura.

Sobre el punto denominado AGRIM se instaló el equipo base GNSS RTK. A partir de este punto, con el receptor móvil (rover), se midieron nuevos puntos fijos alrededor del predio de la FAU. Estos puntos se utilizaron para estación y orientación en la taquimetría electrónica desarrollada posteriormente. En la Tabla 1 se presentan los puntos medidos con ese fin. Sus coordenadas X e Y están expresadas en el sistema de proyección cartográfica Gauss-Krüger, faja 6. La cota ortométrica del punto denominado PILAR 3 fue determinada mediante nivelación geométrica, tomando como referencia una ménsula cercana perteneciente a la red altimétrica de la Facultad de Ingeniería (Justo, 2018), la cual está vinculada a la red de alturas del IGN.

Tabla 1: Puntos fijos utilizados para el inicio de la taquimetría con estación total.

PUNTO	X	Y	Cota	Código
1	6137483.33	6413804.75	17.937	PILAR 3
2	6137534.01	6413847.35	-	PF1

En la Figura 2 (izquierda), se observa la instalación del receptor base sobre el punto AGRIM, junto con las mediciones de los puntos PILAR 3 y PF1 con el equipo rover.



Figura 2. Izquierda: Receptor base sobre el punto AGRIM. Centro: Receptor rover sobre punto PILAR 3. Derecha: Receptor base con bastón centrador sobre punto PF 1.

3- Taquimetría electrónica con estación total

La taquimetría electrónica realizada con un instrumento de estación total permite la determinación simultánea de las coordenadas X, Y, Z de los puntos levantados (Wolf, 2016). Mediante esta técnica, se realizó el levantamiento planialtimétrico de los elementos de interés, entre otros:

- Edificaciones
- Espacios de circulación

- Veredas y canteros
- Escurrimientos pluviales

Reducción de coordenadas: Para facilitar la manipulación de los datos, se aplicó una reducción de las coordenadas originales, restando 6.130.000,00 m en X y 6.410.000,00 m en Y. Esta práctica minimiza la posibilidad de cometer errores al transcribir o controlar valores con muchas cifras. Al finalizar el trabajo esas mismas magnitudes fueron nuevamente sumadas para contar con datos georreferenciados.
En la Figura 3, se presentan fotografías del desarrollo de relevamiento con estación total, incluyendo la visualización de datos en pantalla del instrumento.



Figura 3. Relevamiento planialtimétrico con instrumento de estación total.

Las mediciones con estación total comenzaron con el equipo ubicado sobre el punto denominado PILAR 3. Este método requiere un segundo punto para definir la orientación del equipo, y para ello se utilizó el punto denominado PF1. De ese modo, fue posible vincular el levantamiento realizado con estación total al sistema POSGAR 07.



Figura 4. Mediciones complementarias y de control.

4- Mediciones complementarias
Además del levantamiento con estación total, se realizaron mediciones complementarias para control y verificación de los resultados:

- Control planimétrico: Se midieron distancias entre puntos con un distanciómetro de mano, comparándolas con las obtenidas en la estación total.

- Control altimétrico: Se utilizó un nivel de anteojo y mira topográfica para verificar las cotas obtenidas con la estación total.

Resultados

En este trabajo se relevaron aproximadamente 250 puntos de interés. Para cada uno de estos puntos, se determinaron las coordenadas X e Y correspondientes a las posiciones Norte y Este en la proyección cartográfica Gauss-Krüger (faja 6), dentro del marco de referencia oficial POSGAR 07. Además, se determinó la cota de cada punto, es decir, su altura referida al cero altimétrico oficial del IGN.

Los controles realizados con nivel de anteojo y distanciómetro de mano mostraron diferencias inferiores a 1 centímetro (0,01 m), lo cual se considera admisible para este tipo de trabajo. Previo a estos controles, se realizó una verificación preliminar superponiendo los puntos con el Ortomosaico georreferenciado, lo que permitió detectar errores groseros.

Una vez procesados y controlados, los datos fueron volcados en un archivo CAD, herramienta con la que se representaron los elementos relevados y se incorporaron los puntos con información altimétrica.



Figura 5. Representación del levantamiento planialtimétrico en un archivo CAD.

El trabajo se ejecutó por sectores, realizando cinco entregas entre marzo y noviembre de 2024, hasta su finalización. Cada etapa requirió una interacción constante entre el equipo del Departamento de Agrimensura y los responsables de la FAU, con el objetivo de proporcionar los resultados solicitados en el formato requerido (CAD: DXF).

Finalmente, los estudiantes que participaron en el trabajo pudieron acreditar sus Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS), presentando un informe individual y realizando una exposición en la que explicaron su participación en el proyecto.

Conclusiones

Finalizada esta tarea:

- Se lograron cumplir los requerimientos de precisión y nivel de detalle establecidos para este tipo de trabajo. Los datos georreferenciados entregados a la FAU sirvieron como base para el desarrollo del sistema BIM.
- Los estudiantes que participaron pudieron aplicar en un contexto real los conocimientos y habilidades adquiridos a lo largo de su carrera. La ejecución de esta actividad les permitió interactuar con profesionales de otras disciplinas, planificar y llevar a cabo las tareas de relevamiento conforme a requerimientos específicos, así como cumplir con los plazos de entrega, replicando de esta manera el ejercicio de la profesión.
- Desde la perspectiva de la enseñanza-aprendizaje, la experiencia resultó altamente enriquecedora. Realizar el trabajo en un entorno profesional, con objetivos concretos y responsabilidades definidas, favoreció una mayor motivación y compromiso por parte de los estudiantes en comparación con las prácticas convencionales.
- La experiencia adquirida en este y en otros proyectos similares permite afirmar que la ejecución de actividades de este tipo, desarrolladas fuera de la estructura curricular tradicional y enmarcadas dentro de las Prácticas Profesionales Supervisadas, contribuye significativamente a la maduración de los contenidos de cátedra. Además, fortalece la preparación de los estudiantes para su futuro desempeño profesional, tanto en el ejercicio independiente de la Agrimensura como en relaciones de dependencia en el ámbito público y privado.

Bibliografía

- Berné-Valero, J. L., Anquela Julián, A. B., & Villén, N. G. (2014). *GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Universitat Politècnica de València.
- Instituto Geográfico Nacional. (2009). Adopción del Nuevo Marco de Referencia Geodésico Nacional. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07
- Justo, C. (2018). *Tratamiento estadístico de una red altimétrica topográfica* (Tesis de Maestría).
- Facultad de Arquitectura y Urbanismo. (2024, mayo 24). Programa de Gestión Integral Edilicia de la FAU. https://www.fau.unlp.edu.ar/novedades-fau/programa-de-gestion-integral-edilicia-de-la-fau/
- Santecchia, G. S., & Span, J. M. (2020). Comparación de dos modelos digitales de elevación generados a partir de un sistema UAV e instrumental GNSS. *Mapping. Revista Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra*.
- Vázquez, G., Paús, P., Romano, J., Aldasoro, R., & Bergamini, J. (2019). Evaluación de estaciones totales según norma ISO 17.123-5. *5º Jornadas ITE*.
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). *Topografía*. Alfaomega.

RED ALTIMÉTRICA COMO INSTRUMENTO DE FORMACIÓN Y EVALUACIÓN

Justo [1,2], Claudio E.; Calandra[2], María Valeria; Rodríguez [1,2], Franco

[1] Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
[2] UIDET GAMEFI
claudio.justo@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La realización de tareas altimétricas con la necesaria vinculación al nivel del mar en la zona del Gran La Plata se tornó difícil a principios de este siglo. Esto ocurría generalmente por la falta de información oficial actualizada. A raíz de esa situación en el año 2010 desde la cátedra de Cálculo de Compensación y gracias a la motivación de tres estudiantes se realizó un Trabajo Final de Carrera titulado "Control de Calidad de una Red Altimétrica Existente". En él se estudiaron con técnicas estadísticas las diferencias entre los valores oficiales de cotas con los de un relevamiento realizado en esa oportunidad. Se aprovechó para su desarrollo un sector de la red altimétrica existente en parte del casco urbano de La Plata. Esta etapa abarcó unas 500 has. Con posterioridad, en el año 2018 y con la posibilidad de contar con un becario, se realizó un trabajo similar con ménsulas existentes en el campus de la Facultad de Ingeniería. Finalmente, en el año 2022 con la participación de otros becarios se realizó una vinculación entre ambas redes. Todos los trabajos se realizaron mediante nivelación geométrica y con equipos digitales de la misma marca. A fines del mismo año se realizó el ajuste de todas las observaciones en una sola red. El resultado fue satisfactorio cuando se comparó la varianza kilométrica de la red con la respectiva varianza del fabricante mediante el estadístico Chi Cuadrado. Superado el ajuste estadístico, se decidió su publicación, poniendo la red a disposición de quienes pudieran emplearla para el uso académico e incluso para los profesionales que tuviesen interés en realizar sus propios estudios. Un resultado, no buscado, pero muy significativo fue el haber evaluado longitudinalmente el desempeño de nuestros estudiantes en la realización de este tipo de tareas topográficas durante un período que abarcó poco más de una década (2010-2022). Esta afirmación se debe a que las observaciones fueron realizadas en su totalidad por estudiantes de la carrera. Se encontró provechoso y conveniente continuar la realización de esta tarea, cuyos resultados, pueden integrarse a lo largo del tiempo en estudios longitudinales. Esta iniciativa mejoró la calidad y disponibilidad de la información altimétrica en la región, y brindó una valiosa experiencia práctica a los estudiantes, estableciendo una herramienta útil para futuras investigaciones académicas y profesionales. Actualmente se está trabajando en su ampliación.

Palabras Clave: Redes Altimétricas; Evaluación longitudinal; Becarios.

Introducción

Este trabajo, se propone mostrar las implicancias académicas de un trabajo de altimetría

en forma de red llevado a cabo por la cátedra de Cálculo de Compensación de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Consiste en el procesamiento conjunto de observaciones realizadas a lo largo de más de una década. Los relevamientos comenzaron el año 2010 y tuvieron como objetivo evaluar la calidad de una red altimétrica existente constituida por ménsulas del IGN y del MOSP de la Provincia de Buenos Aires. Esta inquietud se originó por problemas reiterados a la hora de contar con referencias absolutas a la hora de realizar trabajos profesionales por parte de los agrimensores. Posteriormente en el año 2018 con la participación de un becario y alumnos voluntarios ser realizó un relevamiento similar en el campus de la Facultad de Ingeniería (FI) donde existen ménsulas establecidas por la Provincia de Buenos Aires, pero carentes de información trazable. Finalmente entre los años 2022 y 2023 se realizó una vinculación de ambas redes, su ajuste conjunto y su publicación en la página de la Facultad para ponerla a disposición de la comunidad [1]. Actualmente se trabaja en la incorporación de tres ménsulas más. Están ubicadas en la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Plaza Italia y la Estación La Plata del Ferrocarril General Roca. Las mediciones están hechas faltando su ajuste a la red general.

Materiales y métodos

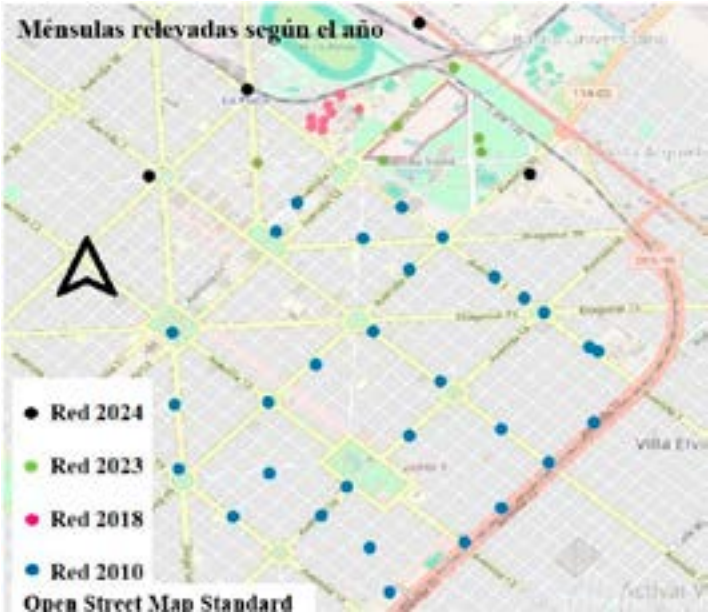
Las marcas físicas de la red se encontraban materializadas desde distintas épocas por distintas instituciones públicas. Sin embargo no podía encontrarse información técnica sobre las campañas, o especificaciones bajo las cuales fueron establecidas. El método de medición empleado para este trabajo fue el de nivelación geométrica por alturas con mediciones simples, es decir, sin ida y vuelta [2]. El instrumental consistió en dos equipos digitales de la marca Sokkia. El primero facilitado por el Agrim. Mario Mémolli y el segundo perteneciente al Departamento de Agrimensura (FI). Las mediciones se hicieron en tres campañas (Figura 1) y fueron realizadas siempre por estudiantes. Luego de las campañas se realizó su ajuste por Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP) en forma mínimamente condicionada. Una vez terminadas las tres campañas, y teniendo la continuidad espacial de mediciones, se realizó el ajuste total. El datum fue ubicado en el punto Nodal 101 de Alta Precisión ubicado en la Pza. Moreno de La Plata. Se empleó el software libre Octave aunque la organización de las mediciones se realizó en la hoja de cálculo de Google Docs. En cuanto a la participación de los estudiantes se contó tanto con voluntarios como con becarios. Hasta el día de hoy son 17 haciéndolo, tres de ellos, como becarios y los demás de forma voluntaria.

Resultados y discusión

Se obtuvieron resultados de diferente índole. El primero fue dar respuesta a una inquietud de carácter netamente técnico y profesional, que era la falta de disponibilidad de un marco altimétrico consistente y con descriptores de calidad. Esto se logró, al menos en un sector del Partido de La Plata, luego de realizado el Trabajo Final de Carrera. Con posterioridad y durante un período de algo más de un lustro fue muy difícil conseguir estudiantes para continuar con la tarea. Recién en el año 2018 con la incorporación de un becario para apoyo a la investigación y la colaboración de tres estudiantes se pudo realizar un trabajo similar en las ménsulas ubicadas en el campus de la Facultad de Ingeniería (Figura 1). Además de las becas, la actualización del plan de estudio permitió a los estudiantes acreditar avances en su carrera mediante la participación en diversas actividades. En 2018 se incorporó la Actividad de Formación Complementaria, lo que propició esta circunstancia. Después de la pandemia, con la implementación de las becas Belgrano (desde 2022 hasta la actualidad), se permitió la incorporación de más estudiantes. La relativa continuidad de los últimos años, junto con la difusión de la Facultad de Ingeniería a través de las redes sociales, ha generado un creciente interés en la participación por parte del estudiantado. Contar con un marco de

referencia altimétrico brinda a los demás docentes de la carrera de Ingeniería en Agrimensura un apoyo necesario para las tareas de cátedra tanto de docencia como investigación y transferencia[8]. Además, contribuye al Departamento de Ciencias Básicas, donde esta cátedra participa en dos UIDET (Unidades de Investigación, Desarrollo y Transferencia), GAMEFI e IMAPEC, realizando trabajos de articulación e investigación que hacen uso de la red altimétrica [3][4][5][6][7]. Finalmente, tras realizar los primeros ajustes, surgió como resultado no planificado la posibilidad de evaluar el proceso de enseñanza-aprendizaje en la ejecución de la nivelación geométrica topográfica durante ese período. Y, por supuesto, la posibilidad de continuar haciéndolo en el futuro. Los resultados de los relevamientos y de los ajustes pueden encontrarse en la hoja de cálculo cuyo link se encuentran disponibles en la página de la cátedra[1]

Figura 1. Sector de la zona de La Plata que abarca la red en la actualidad. Sectores por campañas: **1ra Etapa:** año 2010. **2da Etapa**: año 2018; **3ra Etapa**: año 2022/23**. 4ta. Etapa**: año 2024 en avance.



De la Tabla 1 se obtienen los desniveles medidos y ajustados. Al disponer de las mediciones originales el interesado puede practicar otra estrategia de cálculo.

Tabla 1. Tramos medidos con sus valores de campo, ajustados, y residuos.

TRAMO	DH MEDIDO(m)	DH AJUSTADO(m)	DESV EST. DH(m)	RESIDUO BRUTO(m)	DESV EST. RES(m)	RESIDUO ESTUD.
NODAL 101 - G 102	-1,0450	-1,0448	0,0015	0,0002	0,0005	0,45058
G 102 - G 114	-1,2000	-1,1997	0,0016	0,0003	0,0006	0,45058
G 114 - G 133	5,5510	5,5513	0,0015	0,0003	0,0005	0,57515
G 133 - G 132	1,8820	1,8822	0,0013	0,0002	0,0004	0,57515

En la Tabla 2 están los resultados del ajuste.

Tabla 2. Cotas establecidas con su respectiva desviación estándar.

MENSULA	Cota(m)	Desv Est. Cota(m)	Ubicación
G102	15,781	0,001	16 e/ 56 y 57
G114	14,581	0,002	Diag.74 y Pza. Yrigoyen
G133	20,133	0,002	Av.19 y 63
G132	22,015	0,003	Av.13 y 63

Conclusiones

El trabajo que se está llevando a cabo materializa un marco altimétrico consistente en un sector del Partido de La Plata. Fortalece además la integración entre la docencia y la investigación aplicada en la Facultad de Ingeniería. La participación de estudiantes, tanto becarios como voluntarios, es fundamental para el sostenimiento del proyecto. Por eso es importante desde lo institucional que se sostengan y/o incrementen los programas de promoción de becarios. Por lo expuesto las tareas realizadas convierten actividades de cátedra en recursos académicos y profesionales. Sumado a ello se ven evaluados longitudinal o temporalmente los procesos de enseñanza aprendizaje que se requirieron para su realización.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a los estudiantes: Ing.Agrim. Santiago Louge,Agrim. Ing.Agrim.Ignacio Astorga,Ing.Agrim. Maximiliano Lucangioli, Ing. Agrim. Franco Rodríguez, Ing.Agrim. Franco Loria, Ing. Agrim. Renzo Guionet, Ing. Agrim. Facundo Dubini, y a quienes hoy estudian la carrera: Daniela Luengo, Franco Fuggini, Lucio Jaime, Nicolás Zarza, Martín Rodríguez, Esteban Godoy, Camila Schefino, Nahir Vivas y Pedro A. Lacanette.

Referencias

[1]Justo C.E. https://www1.ing.unlp.edu.ar/catedras/G0408/Repositoriodeenlaces https://docs.google.com/spreadsheets/d/1-LUpQBNmxRK2lnlh9BMO1QZ_6HPALXeg/edit?usp=share_link&ouid=115061986130567786197&rtpof=true&sd=true

[2]P. Wolf and C.D.Ghilani ,2018. Topografía, Alfaomega. Grupo Editor,pp.972

[3]Justo Claudio y Costa Viviana. 2023. Resolución de problemas altimétricos mediante articulación entre cátedras en distintas áreas. Editorial Artemis. DOI: 10.37572/EdArt_2402237438, pp. https://www.editoraartemis.com.br/artigo/33179/

[4]Justo.C.E. y Pintarelli M.B. 2021. Análisis en los residuos de redes altimétricas mínimamente condicionadas. pp. 1-7. ISSN: 2346-1055 - Revista de Topografía AZIMUT.

[5] Costa V. A. y Justo C. E. 2015. El Álgebra Lineal en la Resolución de Problemas

Altimétricos de Topografía. Universidad Tecnológica Nacional. XIX Encuentro Nacional, VII Internacional.

[6]Justo,C.E. y Calandra M.V. 2021. EVALUATION OF ROBUST LINEAR REGRESSION METHODS FOR THE MEASUREMENT OF A TOPOGRAPHIC ALTIMETRIC NETWORK. pp.30-39. ISSN: 2394-2630 - Journal of Scientific and Engineering Research
[7]Justo,C.E y Calandra,M.V. Evaluación de técnicas estadísticas para la actualización de redes altimétricas topográficas. 7° Congreso Argentino de Ingeniería y 13° Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería (CADI-CAEDI 2024) .

[8]Justo C.E. y Romano R.J. Aplicación del modelo de elevaciones Geoide-ar a desniveles geodésicos y su comparación con desniveles geométricos.ISBN: 978-950-34-2256-4. 7° Jornadas ITEE 2023 Facultad de Ingeniería UNLP.

ACTIVIDAD DE FORMACIÓN COMPLEMENTARIA EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN AGRIMENSURA

Paús, Pablo *; Romano, R. José

Grupo de Trabajo en Metrología, Dpto Agrimensura, FI-UNLP. Calle 1 y 47 – La Plata
*pablo.paus@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Este trabajo trata de la implementación de una actividad curricular electiva para los alumnos de la carrera de Ingeniería en Agrimensura de la UNLP. Estas actividades introducen un grado de flexibilidad en el plan de estudios, permitiendo a los estudiantes reforzar competencias según el perfil de la carrera, la región o sus intereses y se incorporan en su currícula académica.

Esta actividad en particular tiene como finalidad introducir a los alumnos en la aplicación de los criterios de la metrología dimensional en mediciones topográficas. Además, brinda la posibilidad de participar en actividades desarrolladas por un grupo de investigación y transferencia de la facultad, enriqueciendo así su formación con diferentes puntos de vista y perspectivas.

Para el desarrollo de esta actividad se utiliza la línea base del Departamento de Agrimensura. Se aplican procedimientos de medición que permiten controlar la repetibilidad y la constante aditiva o constante del prisma en la medida de distancias con Estación Total. A su vez estas medidas, contribuyen a la serie histórica de medidas de la base.

Palabras clave: Enseñanza; Metrología; Línea base; Instrumental MED

Introducción

Los alumnos de las carreras de Ingeniería de la UNLP deben realizar una serie de Actividades de Formación Complementaria (AFC) incluidas en los planes de estudio (FI, ord. 42/22). Entre las actividades disponibles se encuentran la participación en proyectos de investigación, trabajos de vinculación tecnológica, seminarios, talleres y conferencias. Desde el Grupo de Trabajo en Metrología se propuso la AFC: "**Control metrológico de línea base**" para alumnos avanzados de la carrera de Ingeniería en Agrimensura.

Materiales y métodos

Esta AFC en particular tiene como finalidad realizar un control metrológico, sistemático y multitemporal de los desplazamientos observados en uno de los pilares de la línea base del Dpto. de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería (figura 1). La línea base fue construida durante el período 2018/19 y permite controlar la repetibilidad y la constante aditiva en la medida electrónica de distancia con Estaciones Totales (Wolf, 2016) tanto del Departamento como de profesionales externos.

Los alumnos que participen de esta actividad tendrán la tarea de relevar los datos necesarios para determinar la constante aditiva del prisma, así como el grado de desplazamiento experimentado por el pilar comparando los valores obtenidos con la serie histórica de distancias. Considerando la participación de distintos grupos de alumnos a lo largo del año se podrá monitorear esta situación de manera significativa.

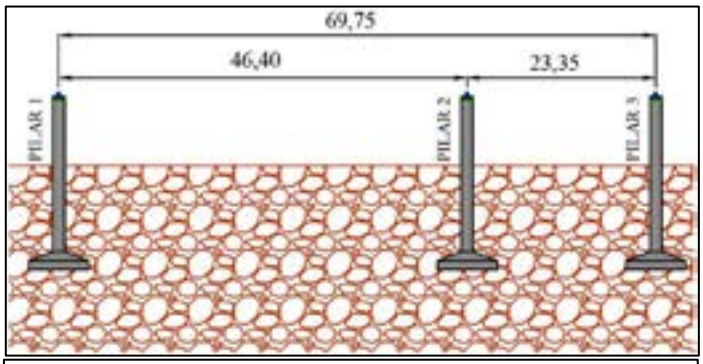


Figura 1: Esquema de la base de calibración corta con sus distancias (en metros) de referencia.

Desarrollo Pedagógico.

La actividad se desarrolla en 12 horas presenciales distribuidas en cuatro encuentros semanales. Además, de la dedicación no presencial requerida para el estudio de la problemática, procesamiento de las mediciones, obtención de resultados y elaboración del informe correspondiente. Las mediciones y elaboración de informes se realizan en grupos reducidos de dos o tres alumnos.

Durante los encuentros presenciales, se expone la problemática y la metodología de trabajo, se reconoce el instrumental a utilizar, se realizan las mediciones de las distancias sobre la línea base y se discuten y analizan los resultados. Finalmente, se elaboran las conclusiones y los alumnos realizan una exposición del informe presentado.

Desde una perspectiva didáctica, esta actividad requiere el compromiso y la participación activa de los estudiantes. Los docentes establecen las pautas generales, proporcionan la información necesaria y supervisan el proceso. Son los alumnos quienes llevan a cabo las mediciones, analizan los resultados y elaboran conclusiones.

Procedimientos de campo

Para garantizar que las mediciones alcancen el grado de precisión necesario en estos procedimientos, se lleva a cabo el montaje del instrumento y del prisma reflector utilizando sistemas de centrado forzado. Esto permite minimizar los errores de centrado.



Figura 2: Sistema de centrado forzoso.

Se establecen valores específicos de medición de acuerdo con el procedimiento a desarrollar. El modo de medición del instrumento se establece en “fino con promedio de tres”. También se fija en cero el valor de la constante del prisma, así como la magnitud de la

corrección por condiciones atmosféricas en partes por millón (ppm).

Durante la campaña de medición, cada una de las seis distancias posibles entre los tres pilares es medida y registrada seis veces, alternando en cada ocasión, entre las posiciones del anteojo círculo izquierdo y derecho (directa e invertida). Además de las 36 mediciones de distancias, deben ser registradas las condiciones atmosféricas y cualquier particularidad relevante que acontezca.

Todas las mediciones y datos adicionales se registran en un modelo de planilla especialmente confeccionado para este procedimiento. Esta forma de trabajo brinda una guía en la secuencia de medición y a su vez garantiza que no se omita ningún paso. El modelo de la planilla utilizada se muestra en la figura 3.

Grupo de Trabajo en Metrología
Gabinete de Instrumental Topogeodésico
Prof.Ing. "Gabriel Jesús Gómez"

DISTANCIÓMETRO — FR-002 — Versión 1 — Pag. 1/1

NI: Topcon Aeon

Control de estado | Batería | Fecha: 03/03/2023

ESTACIÓN: PILAR I | T(°C): 30.4 | P(hPa): 1008,4 | ppm: 0 | HR (%): 60 | Inicio: 9:30 | Cte. Prisma: 0

Nº DE PUNTO	PUNTO VISADO	DISTANCIA MEDIDA	REGISTRO DE MEDIDAS (m) CI	CD	Observaciones
1	2	1.2	46,3919	46,3919	
2	2	1.2	46,3919	46,3919	
3	2	1.2	46,3919	46,3919	
4	3	1.3	69,7406	69,7406	
5	3	1.3	69,7406	69,7406	
6	3	1.3	69,7406	69,7406	

CONDICIONES DE MEDICIÓN

	INICIO	FIN	Nº DE SERIE	Modo de Medición
Hora:	9:50	10:17		
T(°C):		31,6	Tipo de reflector	
P(hPa):		1008,6		
HR(%):		56 %		
CLIMA	Despejado sin viento			
OPERADORES				

Figura 3: Planilla de campo. Registro de las distancias observadas y otros datos complementarios.

A diferencia del registro de datos en la memoria interna de la estación total, el registro en "papel" posibilita el control continuo de las observaciones y el análisis de la variabilidad en las mediciones repetidas.

Resultados y discusión

Una vez finalizadas las tareas de campo, los alumnos cuentan con todas las mediciones necesarias para avanzar a la etapa de cálculos. El primer paso de esta instancia consiste en transferir todos los datos a formato digital, para lo que se utilizan planillas de cálculo. En estos archivos, se realizan los cálculos necesarios para obtener los resultados deseados, incluyendo el cálculo de promedios, residuos, errores de offset y, finalmente, las distancias corregidas.

En esta etapa, se llevan a cabo controles sobre los residuos de las observaciones. Se verifica que los datos muestren un comportamiento que se ajuste a una distribución normal, observando la simetría entre residuos positivos y negativos, detectando valores atípicos, así como la identificación de posibles sesgos en las mediciones.



Figura 4: Ploteo de residuos correspondientes a las 36 distancias observadas. En el caso ilustrado el máximo desvío corresponde a 1.7 mm.

En la tabla 1 se muestran los resultados de una de las aplicaciones del procedimiento desarrollado. La medición de distancias en modo fino permite registrar distancias con cuatro decimales. No obstante, los resultados finales se expresan al milímetro dado que el equipo empleado tiene una precisión de ± 2mm + 2 ppm.D.

Los tres pilares que conforman la línea base se denominan con los números 1, 2 y 3 (figura 1). Las distancias se designan de acuerdo con los pilares que las definen, por ejemplo 1.3 es la distancia entre los pilares 1 y 3. Para el caso mostrado en la tabla 1, las distancias resultantes son: 1.2: 46,394 m; 1.3: 69.745 m; 2.3: 23,350 m.

Tabla 1: Resultados de la aplicación del procedimiento.

Promedios		**E. OffSet parcial**	**Distancias observadas**		**Error del OffSet (m)**	**Distancias corregidas (m)**
Design.	**Medida (m)**		**Design.**	**Medida (m)**		
1.2	46.3613	0.0322	1.2	46.3611	0.0326	**46.394**
1.3	69.7118					
2.3	23.3184		1.3	69.7119		**69.744**
2.1	46.3610	0.0330				
3.1	69.7120		2.3	23.3182		**23.351**
3.2	23.3181					

Finalmente, con los resultados obtenidos y analizados, los estudiantes elaboran un informe que detalla todo el proceso realizado. En este informe, explican el procedimiento aplicado, analizan los resultados alcanzados y presentan las conclusiones, tanto personales como grupales.

Durante el último encuentro de la actividad, los alumnos hacen una defensa de su informe, discutiendo y analizando los resultados. Este proceso les permite desarrollar habilidades de comunicación escrita a través de la redacción de un informe técnico y de expresión oral al explicar la actividad realizada.

La actividad concluye con una retroalimentación por parte de los docentes a cargo de la actividad, quienes destacan los aspectos más sobresalientes del trabajo y señalan áreas en las que se podrían mejorar los resultados.

Como producto de esta AFC, los alumnos incorporan más horas de práctica con

instrumental y se pone el foco en aspectos metrológicos de la medición de distancia, como es la estimación y posterior desafectación del error de offset del conjunto instrumento-prisma. De esta manera, se toma conciencia práctica de la existencia de errores instrumentales y cómo debe ser su tratamiento.

Conclusiones

Como conclusiones de este trabajo se enumeran las siguientes:

1. Se logró introducir a los alumnos en la aplicación de criterios de metrología dimensional en mediciones topográficas, en el reconocimiento y tratamiento de errores instrumentales y en la implementación de procedimientos normalizados.
2. Los alumnos que aplican a esta actividad están avanzados en la carrera y la práctica se realiza en grupos reducidos. Esto posibilita un mayor grado de autonomía y manejo más personalizado del instrumental. Este aspecto ha sido muy valorado en las devoluciones de los estudiantes, evidenciando un crecimiento en su capacidad de trabajo independiente.
3. Se ha enriquecido la formación como Ingenieros Agrimensores de los estudiantes a través de la participación en actividades desarrolladas por un grupo de investigación y transferencia de esta facultad, aportando diferentes puntos de vista y perspectivas al aprendizaje.
4. Finalmente, los estudiantes han puesto a prueba sus habilidades de expresión oral y escrita, lo que ha contribuido a aumentar su experiencia en estas áreas fundamentales para su desarrollo profesional.

Referencias

- ISO 17123-4. (2012). Optics and optical instruments. Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). Second edition.
- Ordenanza 42. (2022). Facultad de Ingeniería. UNLP.
- Paús, P., Romano, J., Paredi, J.; Bergamini, J. y Aldasoro, R. (2019). Construcción de una base corta de calibración en el departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. 5tas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería. 134 a 139. ISBN 978-950-34-1749-2. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/75011
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). Topografía. Alfaomega.

OBTENCIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN CON IMÁGENES EN EL RANGO VISIBLE CAPTURADAS POR DRONES CONVENCIONALES

QUISPE GUTIERREZ, Liliana Teresa – ROMANO, Roberto José - PAREDI, Jorge

Dpto. Agrimensura, FI-UNLP. Calle 1 y 47 - La Plata

liliana.quispe@ing.unlp.edu.ar

Introducción

En la asignatura “Agrología e Información Rural” del 8º semestre de la carrera de Ingeniería en Agrimensura, se adoptó y validó una metodología para obtener índices de vegetación utilizando imágenes capturadas por drones con cámaras fotográficas convencionales.
El objetivo principal de este trabajo fue aplicar índices de vegetación, mediante una actividad con los estudiantes de la cátedra, para generar información cualitativa y cuantitativa sobre el estado de la vegetación en un área específica.
En teledetección (Chuvieco, 1995), una imagen multibanda es aquella que contiene información en varias regiones del espectro electromagnético. Cada banda representa un rango específico del espectro, como el azul, verde, rojo, infrarrojo cercano o infrarrojo medio, entre otros. Estas bandas expresan la reflectancia de la superficie terrestre en sus respectivas longitudes de onda, utilizando valores numéricos cuya escala depende de la resolución radiométrica de la imagen (por ejemplo, de 0 a 255 en imágenes ráster de 8 bits). Contar con la radiancia de cada banda expresada en niveles digitales (ND) permite la generación de diferentes capas de información georreferenciada a partir del procesamiento de las bandas de una imagen. Calcular índices de vegetación y otros indicadores es una de las aplicaciones más explotadas actualmente en teledetección.
Un índice de vegetación es un indicador cuantitativo que se calcula a partir de la información contenida en imágenes multiespectrales, generalmente mediante la combinación matemática de diferentes bandas espectrales. Estos índices tienen como objetivo resaltar la presencia, cantidad o estado de la cubierta vegetal en una zona específica. Los índices de vegetación aprovechan la respuesta diferencial de la vegetación en ciertas regiones del espectro electromagnético, como el visible rojo, verde y azul (RGB) y el infrarrojo cercano (NIR).
Los tipos de índices verdes más frecuentemente utilizados (Schell, 2024) son: NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), EVI (*Índice de Vegetación Mejorado*), GNDVI (*Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde*) y SAVI (*Índice de Vegetación ajustado al Suelo*). Para su utilización es necesario contar con sensores que capturen el sector infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético.
Los drones convencionales están equipados con cámaras que permiten obtener imágenes formadas únicamente por bandas del espectro visible (RGB), mientras que las cámaras que permiten capturar la banda del NIR son muy costosas y, por ello, de difícil acceso.
El lugar de trabajo elegido fue la Estación Experimental J. Hirschhorn de la UNLP, específicamente en el sector donde funciona el Polo Productivo Social. Durante la práctica de campo desarrollada, los estudiantes planificaron y ejecutaron un vuelo con el dron, obteniendo las fotografías aéreas necesarias para la obtención de los índices verdes.
Se analizaron los índices de vegetación RGB: RGBVI y ExG. Los resultados fueron comparados con productos equivalentes obtenidos a partir de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 (ESA, 2015) mediante la plataforma Land Viewer.

Parte experimental

Generación de Ortomosaico:

En una práctica con estudiantes desarrollada el 21/11/2024 se realizó un vuelo con dron a 120 m de altura sobre el predio de la UNLP, ubicado entre las calles 167, 173, Av. 66 y 72 de la localidad de Los Hornos, en la Estación Experimental J. Hirschhorn. El dron “Phantom 4 Advanced” del Departamento de Agrimensura ejecutó el vuelo de forma autónoma siguiendo una planificación previamente establecida. El sensor con el que cuenta este dispositivo es una cámara convencional RGB.

Mediante técnicas fotogramétricas, a partir de las fotografías obtenidas, se generó un ortomosaico georreferenciado del sector volado (Figura 1). Este tipo de producto cartográfico permite extraer información tanto cualitativa como cuantitativa sobre los elementos (edificaciones, caminos, cultivos, etc.) presentes en el terreno. El ortomosaico se obtuvo con un tamaño de píxel de 3,5 cm.



Figura 1: Ortomosaico georreferenciado del sector analizado.

Índice verde sin dependencia de infrarrojo:

Una alternativa para la aplicación de índices verde cuando no se dispone de sensores con la capacidad de medir reflectancia del NIR es utilizar algoritmos que se basan únicamente en las bandas RGB (Lussem, 2018).

En la práctica con estudiantes se aplicaron los índices RGBVI y ExG (tabla 1). Para clarificar, se analiza con más detalle el índice RGBVI. En las fotografías obtenidas, cada una de las bandas RGB es una matriz de celdas o píxeles con un valor digital de 0 a 255 (8 bits) que caracteriza la radiancia y reflectancia de distintas coberturas terrestre en ese sector. Cada píxel representa un sector del terreno, por lo que el valor de reflectancia expresa las características de esa superficie.

En el caso del índice RGBVI, a cada píxel (unidad de terreno) se le aplica la fórmula:

$$\frac{Green^2 - (Red * Blue)}{Green^2 + (Red * Blue)}$$

El rango típico de RGBVI es de -1 a 1, de acuerdo con los valores que tomen cada banda RGB en las distintas coberturas. Si la vegetación es abundante y sana, la banda verde tendrá un valor alto, mientras que la roja y la azul serán bajas. Esto hará que el numerador sea positivo y el índice tenga un valor alto. Mientras que, si la vegetación está estresada o presencia escasa el valor del índice reducirá. En tanto que, si hay poca o nula vegetación (suelo desnudo, agua, infraestructura), las bandas tendrán valores similares, haciendo que el RGBVI sea bajo o cercano a cero.
En la tabla 1 se volcaron las fórmulas y los rangos de los dos índices RGB utilizados.

Tabla 1: índices verdes obtenidos a partir de RGB

Índice	Fórmula	Rango Típico
ExG	$2 * Green - Red - Blue$	0 a 255 (8 bits)
RGBVI	$\frac{Green^2 - (Red * Blue)}{Green^2 + (Red * Blue)}$	-1 a 1

Para realizar una clasificación de la cobertura vegetal se emplearon cuatro clases:

- Clase 1: **Vegetación nula** (suelo labrado, edificios, invernáculos, pavimentos y calles)
- Clase 2: **Vegetación escasa o rala** (suelo con vegetación aislada)
- Clase 3: **Vegetación moderada** (pastizales y sectores parquizados)
- Clase 4: **Vegetación densa** (árboles y cultivos saludables)

El proceso de clasificación de los índices se llevó a cabo de manera supervisada, dividiendo el rango de valores posibles a partir del análisis visual del ortomosaico. Para ello, se utilizó el software QGIS, que generó una clasificación inicial por cuantiles, distribuyendo los valores en clases según su frecuencia estadística. Posteriormente, se realizaron ajustes en los límites de cada clase, validando y refinando la clasificación a través de un análisis detallado de muestras puntuales. Este enfoque permitió mejorar la precisión y la representatividad de las clases obtenidas, asegurando una mayor fiabilidad en los resultados.

Control:

Para verificar los resultados, se aplicó el índice NDVI utilizando imágenes de Sentinel-2A, que incluyen la banda del NIR. Aunque la resolución espacial es de 10 m, estas imágenes no las convierte en la mejor opción debido al tamaño del píxel, su uso fue adecuado para realizar un control sobre elementos con una extensión mayor a 10 m, como edificaciones, áreas con cultivo y caminos.

Resultados

Como resultado final, se obtuvo para cada tipo de índice RGB un mapa temático categorizado representando el estado de salud, presencia y ausencia de vegetación, utilizando índices verdes generados con imágenes RGB (figura 2).
Los resultados muestran una alta concordancia entre ambos índices en las clases de los extremos 1 y 4, que corresponden a áreas con ausencia total o una alta presencia de vegetación. Sin embargo, el acuerdo disminuye en las clases intermedias 2 y 3, donde los límites son más difíciles de definir debido a la presencia parcial de vegetación. En estas zonas, las diferencias entre los resultados de ambos índices se vuelven más evidentes, lo que refleja la complejidad de clasificar áreas con vegetación intermedia, en ausencia de la banda NIR.

En el contexto de una práctica de campo de la cátedra, la experiencia fue altamente positiva, ya que permitió a los estudiantes experimentar de primera mano tanto las posibilidades que ofrecen los índices verde RGB como las limitaciones y desafíos de trabajar sin la banda NIR.

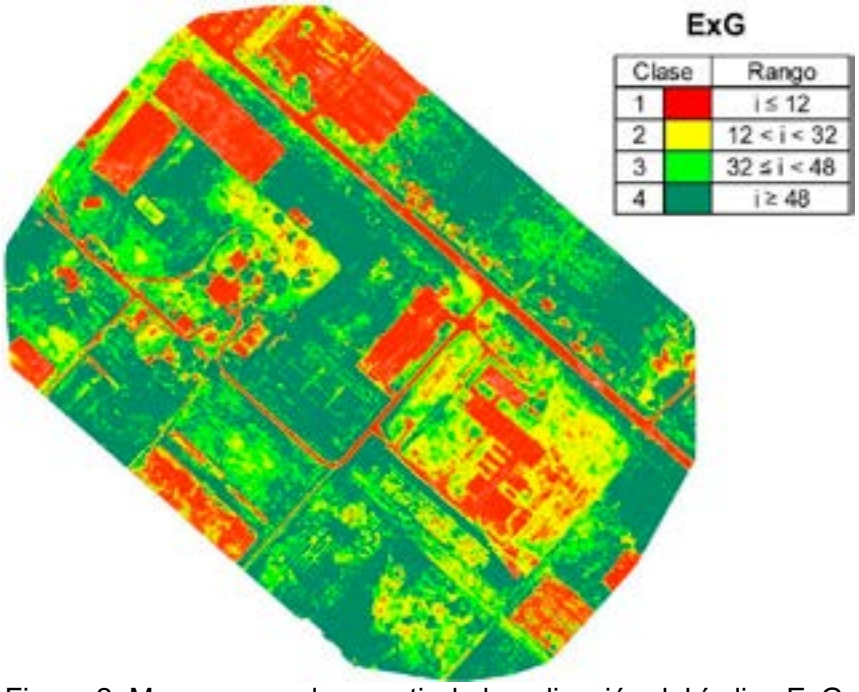


Figura 2. Mapa generado a partir de la aplicación del índice ExG.

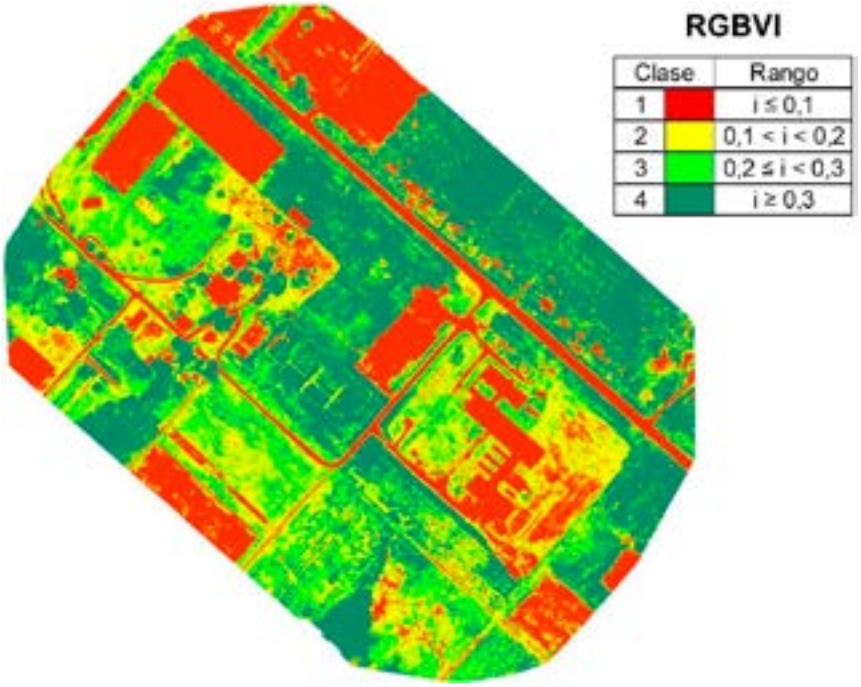


Figura 3. Mapa generado a partir de la aplicación del índice RGBVI.

Control de resultados: NDVI Sentinel 2A

Para validar los mapas generados, se elaboró un nuevo mapa utilizando una imagen de Sentinel 2A sobre la cual se aplicó el índice verde NDVI. A pesar de que la resolución espacial de Sentinel 2A (10 metros) corresponde a una escala métrica diferente, se establecieron sectores de comparación mediante elementos comunes como edificios, caminos y áreas con distintas etapas de crecimiento de cultivos.

La imagen utilizada corresponde al 20/11/2024, un día antes del vuelo con dron. Esta imagen incluye la banda NIR, tiene una resolución radiométrica de 16 bits y un tamaño de píxel de 10 m en esta banda.
El mapa generado con el índice verde NDVI (ver Figura 4) se obtuvo utilizando el programa QGIS. El algoritmo configurado por defecto para el cálculo de este índice incluye los intervalos para las 4 clases, sin necesidad de ajustes adicionales por parte del operador.

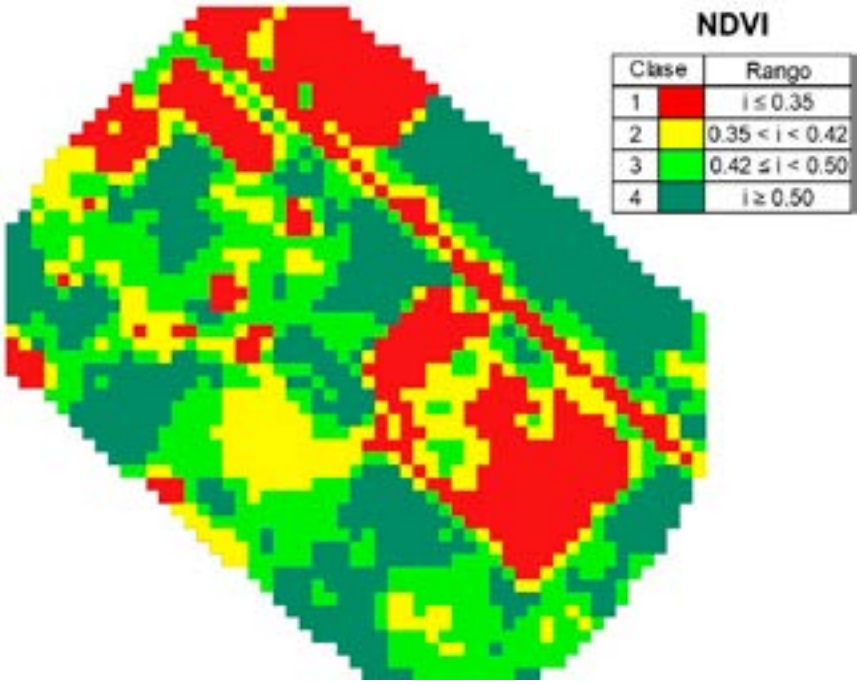


Figura 4. Mapa generado a partir de la aplicación del índice NDVI (Imagen Satelital: Sentinel 2A).

Al comparar el mapa NDVI de la Figura 4 con los mapas generados mediante índices RGB, basados en el ortomosaico, la diferencia más notoria es la resolución espacial (tamaño del píxel), que es de 0,035 m en el primer caso y 10 m en el segundo.
El control se realizó comparando sectores con dimensiones superiores a los 10 m. La mayor concordancia se observó en las clases extremas, que corresponden a áreas con vegetación plena o ausencia total de vegetación. En general, se identificaron los mismos sectores en las 4 clases. Este control permite concluir que los índices verdes RGB utilizados detectaron información equivalente a la proporcionada por el NDVI.
Se considera que este control valida los resultados obtenidos con los mapas ExG y RGBVI.

Conclusiones

Tras el desarrollo de esta experiencia, se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

1. **Experiencia práctica:** Los estudiantes pudieron realizar una práctica de campo compleja, obteniendo datos propios del terreno, lo que les permitió alcanzar resultados concretos sobre los cuales generar discusiones y nuevas propuestas.

2. **Base para futuras experiencias:** La práctica servirá como base para el desarrollo de nuevas experiencias de este tipo, contribuyendo a la formación de los estudiantes en el uso de índices de vegetación y su aplicación en el campo.

3. **Alcances y limitaciones de los índices verdes RGB:** Fue posible evaluar los alcances y limitaciones de los índices verdes RGB analizados utilizando datos propios, lo que brindó una comprensión más profunda de su rendimiento en condiciones reales.

4. **Utilidad de los índices para vegetación extrema:** Los índices RGB demostraron ser útiles para automatizar la detección de áreas con presencia o ausencia total de vegetación, sin requerir demasiada intervención del usuario.
5. **Limitaciones en vegetación parcial:** No se recomienda el uso de estos índices RGB cuando la presencia de vegetación es parcial, ya que los resultados mostraron diferencias significativas entre los mapas generados con el índice ExG y el RGBVI.
6. **Necesidad de supervisión del usuario:** Con ambos índices RGB, fue necesario contar con supervisión del usuario para ajustar los rangos de las clases, ya que no fue posible realizar una clasificación completamente automatizada que generara resultados válidos.
7. **Aplicabilidad en la enseñanza y la práctica profesional:** Este enfoque no solo ha demostrado ser útil para su implementación en el dictado de la materia, sino que también es aplicable en el ejercicio profesional habitual, ofreciendo una alternativa práctica y accesible para realizar estudios de vegetación, siempre que se tenga en cuenta el conocimiento de las limitaciones técnicas de estas herramientas.

Bibliografía

- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A., & Winschel, C. (2018). Preprocesamiento de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6.0. *Instituto de Clima y Agua, C.I.R.N. INTA Castelar*, 1-31.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2º ed.). Ediciones RIALP, S.A.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., VonBargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE, 38*(2), 259–269. https://doi.org/10.13031/2013.27838
- Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International, 16*(2), 65–70. https://doi.org/10.1080/10106040108542184
- Schell, D., Rouco, L., & Albornoz, J. (2024). Introducción a la Teledetección con herramientas de procesamiento en la nube. *CONAE, Curso: Introducción a la Teledetección con herramientas de procesamiento en la nube*.
- Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M. L., Jasper, J., & Bareth, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-3*, 7–10. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-217-2018
- European Space Agency (ESA). (2015). SENTINEL 2. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2

CASCIENCIAS BÁSICASCI

ACTIVIDAD DE ARTICULACIÓN INTERDISCIPLINARIA: DESCARGA DE UN CAPACITOR COMO PUENTE ENTRE MATEMÁTICA Y FÍSICA EN LA FORMACIÓN EN INGENIERÍA

Torroba Patricia, Costa Viviana, Devece Eugenio y Porcel de Peralta Benjamín

Unidad de Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias-UIDET IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
vacosta@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En el marco del Proyecto "Articulación en las Ciencias Básicas para Carreras de Ingeniería" y del Grupo de Investigación IMApEC del Departamento de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), se han desarrollado diversas estrategias interdisciplinarias que integran matemática, física y tecnología. Estas acciones buscan fomentar competencias esenciales en los estudiantes de ingeniería mediante un enfoque innovador y colaborativo.

En la formación de los futuros ingenieros, varias son las innovaciones educativas que se proponen con el objetivo de lograr aprendizajes significativos, adquirir habilidades, entre otras. Además, se destaca la importancia de profundizar en la integración durante el proceso educativo de matemática y física. Así lo destacan, Pepin, Biehler & Gueudet (2021), en “Mathematics in Engineering Education: A Review of the Recent Literature", que ofrece una visión general de las prácticas actuales en la enseñanza de matemáticas dentro de la educación en ingeniería, analizando recursos y prácticas innovadoras que pueden influir en la reforma curricular. También, Dominguez, De la Garza, Quezada-Espinoza & Zavala (2023), en "Integration of Physics and Mathematics in STEM Education: Use of Modeling" donde evalúan la efectividad de un enfoque pedagógico para estudiantes de primer año de ingeniería al diseñar un curso integrado de física y matemáticas basado en el modelado.

En resumen, la vinculación entre física y matemática en el ciclo básico, resulta fundamental para desarrollar habilidades de análisis, modelado y resolución de problemas. Estas disciplinas no solo proporcionan las herramientas necesarias para entender fenómenos físicos, sino que también constituyen la base para la comprensión de procesos ingenieriles. En un plan de estudios donde los contenidos son “compartimentados” en materias, esa vinculación, en general, no surge espontáneamente por parte de los estudiantes, si no que tienen que ser los mismos docentes los que la faciliten, logrando enfoques de aprendizaje más amplio.

En este contexto, se diseña e implementa una actividad interdisciplinaria con el objetivo de articular conceptos de matemática, física y tecnología a través del fenómeno de la descarga de un capacitor, trabajando además en tareas/problemas/desafíos más cercanos a los de la vida real de un ingeniero.

La propuesta, es desarrollada en el aula de Matemática B (segundo semestre) e incluye la participación conjunta de docentes de ambas disciplinas. Durante la experiencia, los estudiantes experimentan en tiempo real, la descarga de un capacitor en función del tiempo, registrando los valores mediante sensores.

A partir de estas mediciones, se introducen las leyes de Kirchhoff (Seway, 1999) para modelar el fenómeno y se deduce la ecuación diferencial de primer orden que describe el proceso de descarga. La actividad se complementa con una tarea optativa, en la que los estudiantes resumen la experiencia, plantean preguntas, analizan los datos experimentales con GeoGebra y validan los resultados teóricos, ajustando los valores experimentales con la solución exponencial de la ecuación diferencial deducida.

Además, de este modo, se anticipa (de un modo sencillo) un conocimiento de Física II (tercer semestre), como es el concepto de un circuito eléctrico denominado RC (constituido por un elemento denominado capacitor y una resistencia) que se modela matemáticamente con

herramientas de ecuaciones diferenciales de primer orden, contenido de Matemática B (Costa, 2025) aportándole a este último una connotación importante para su estudio en lo que respecta a su uso en la física para modelar fenómenos.
Además, la actividad refuerza la relevancia de las ecuaciones diferenciales en el modelado de fenómenos físicos e ingenieriles, fortaleciendo una perspectiva interdisciplinaria clave en la formación de futuros profesionales.
El trabajo presentado describe el desarrollo de la actividad, los resultados obtenidos y una conclusión que subraya la relevancia de implementar estrategias que integren contenidos de física y matemática, incorporando tecnología para potenciar el desarrollo de competencias esenciales en la formación de ingenieros.

DESARROLLO

La implementación de la Actividad interdisciplinaria comienza con una planificación conjunta entre docentes de matemática y física, autores del presente artículo. En una etapa previa, los profesores de ambas disciplinas (integrantes de IMApEC) se reúnen para analizar los contenidos a articular, identificar puntos de convergencia y definir las estrategias más adecuadas para presentarlos en el aula. En estos encuentros, se toman las decisiones clave sobre la dinámica de la clase, el diseño de materiales didácticos y la integración de la tecnología. Además, se confecciona un Trabajo de Investigación (optativo) para realizar en grupos que consta de dos partes, una previa a la Actividad, con el objetivo que los estudiantes investiguen por su cuenta previamente conceptos que se utilizarán y otra parte posterior a la experiencia en el aula, con el objetivo de profundizar el análisis y reforzar los aprendizajes, y servir de recurso evaluativo de la efectividad de la experiencia.
La actividad se lleva a cabo en el curso de Matemática B y comienza con la presentación de los profesores de Física, quienes introducen el tema y destacan su carácter interdisciplinario. A continuación, se describe la plaqueta que se utilizará, la cual ha sido diseñada por los docentes de la cátedra de Física II y construida por el personal del área técnica de la Facultad. Este dispositivo incluye varios circuitos, entre los cuales se encuentra un capacitor, que inicialmente está cargado y conectado a una resistencia, como se indica en el recuadro en la parte derecha de la Figura 1. Además, se incorpora un sensor, ubicado en la parte inferior izquierda de la Figura 1, que permite registrar en tiempo real los datos de la descarga, los cuales se representan en la parte superior izquierda de la misma figura. 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).

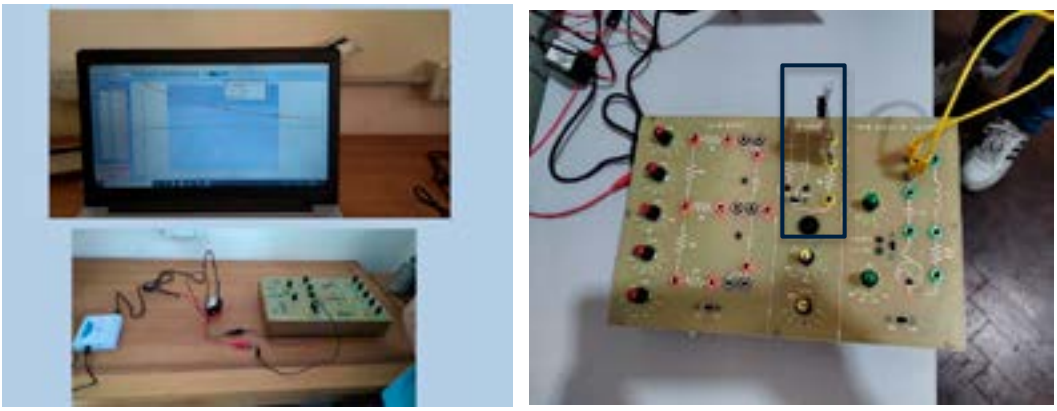


Figura 1: Capacitor e imagen que muestra los valores en tiempo real de su descarga.

Durante la actividad, los estudiantes observan la descarga del capacitor en tiempo real. Los datos registrados por el sensor, diferencia de potencial V que es proporcional a la carga, son proyectados en un gráfico en función del tiempo y ajustados mediante una curva de caída exponencial (Figura 2).

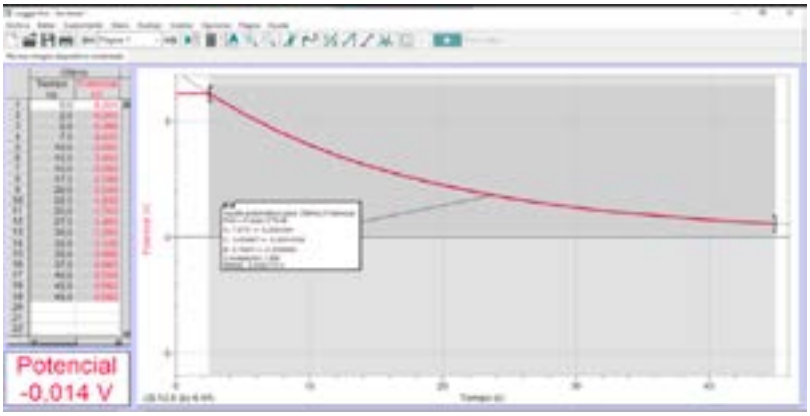


Figura 2: Gráfico de caída exponencial que ajusta los datos de una tabla de valores de tiempo y valores de carga del capacitor.

Paralelamente, los profesores de física, presentan el circuito RC desde el punto de vista teórico, explican qué es un capacitor, las componentes que intervienen (https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_all.html?locale=es) para que pueden utilizarse en la vida cotidiana. A continuación, discuten la ecuación diferencial que describe el fenómeno, la cual se construye utilizando las leyes de Kirchhoff (Seway, 1999) y contextualizan el experimento dentro de su disciplina (Figura 3), presentado todo en forma sencilla y anticipando contenidos de Física II.

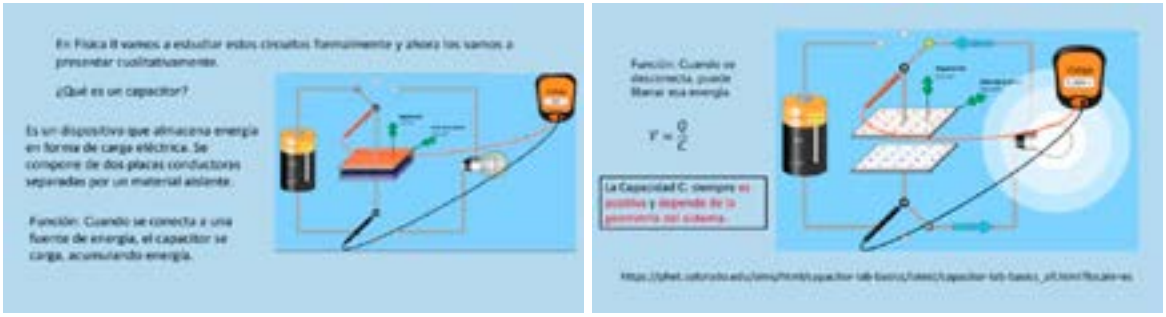


Figura 3: Explicación teórica del experimento realizado.

Luego se construye la ecuación diferencial de primer orden que modela el circuito, y con la intervención de los profesores de matemática, los estudiantes la resuelven utilizando la técnica de separación de variables, contenido estudiado en Matemática B (Figura 4), obteniendo como solución analítica una función de tipo exponencial decreciente.

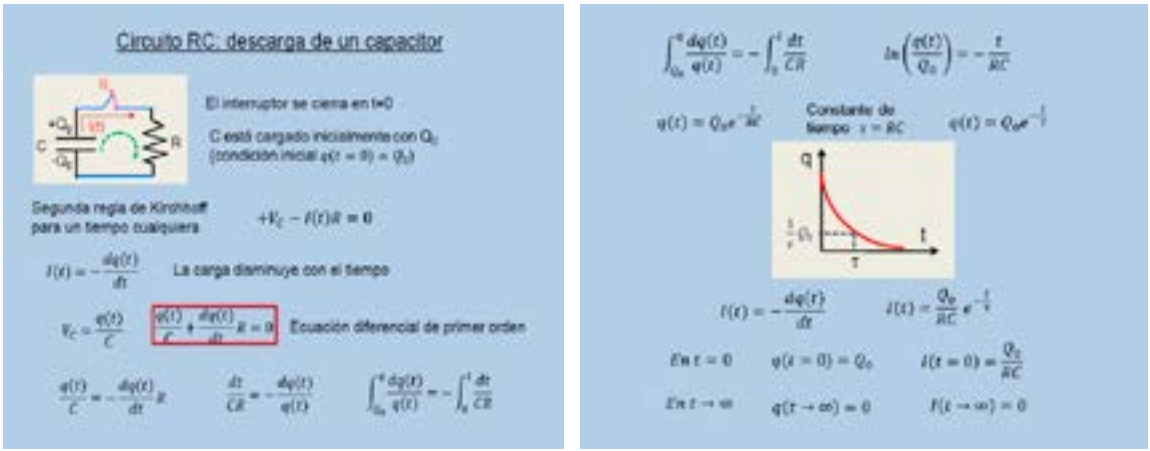


Figura 4: Modelado matemático y resolución de la ecuación diferencial.

Luego, se contrastan los datos experimentales obtenidos y su ajuste (Figura 2) con la solución analítica de la ecuación diferencial (Figura 4), validando el modelo y otorgándole un significado a la matemática utilizada en la resolución de problemas de la física.
Finalmente, como actividad complementaria, los estudiantes, organizados en grupos, pueden realizar un Trabajo de Investigación opcional. Esta actividad tiene un doble propósito: por un lado, fomentar la integración de los conocimientos adquiridos durante la experiencia; por otro, brindar a los docentes una herramienta para evaluar su efectividad.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

A continuación, se detalla un resumen de los resultados del *Trabajo de Investigación* que los estudiantes presentan previo y posterior a la actividad.

La *Parte 1* del Trabajo de Investigación, considerada como investigación previa y realizada antes de la visita de los profesores de Física II, los estudiantes organizados en grupos de dos, investigan los conceptos fundamentales sobre capacitores, guiados por las consignas siguientes.

Trabajo de Investigación: Parte 1 (Previo a la Actividad)

1. Definición y características: Explorar qué es un capacitor, sus características principales y su función en circuitos eléctricos.
2. Aplicaciones: Identificar tipos de circuitos donde se utilizan capacitores y su relevancia en el almacenamiento temporal de energía. Además, describir al menos dos aplicaciones prácticas relacionadas con campos de la ingeniería.
3. Preguntas y dudas: Formular al menos tres preguntas surgidas durante la investigación, estimulando su curiosidad y preparación para la segunda parte del trabajo.

La *Parte 2*, a realizar luego de la experiencia en el aula, incluye las siguientes consignas.

Trabajo de Investigación: Parte 2 (Posterior a la Actividad)

1. Modelado matemático: Plantear la ecuación diferencial que describe la descarga de un capacitor en un circuito RC, utilizando las leyes de Kirchhoff y considerando los parámetros involucrados (resistencia, capacitancia, voltaje inicial).
2. Resolución analítica: Resolver la ecuación diferencial con un valor inicial dado.
3. Experimentación y ajuste: Cargar los datos experimentales en una tabla en GeoGebra, crear una lista de puntos y ajustarlos mediante una curva exponencial. Con el ajuste, estimar los parámetros del circuito y calcular los tiempos para los cuales la descarga sería del 30 % y del 1 % de la carga inicial. Grafiar, la solución teórica en GeoGebra, contrastar entre datos experimentales y el modelo teórico, estimar los parámetros del circuito.

Las Partes 1 y 2, son estregadas por los estudiantes en el sitio de una Tarea en el Classroom de la clase, y los resultados obtenidos se sintetizan a continuación.

Resultados Parte 1:

En torno al inciso 1: *Definición y características: Explorar qué es un capacitor, sus características principales y su función en circuitos eléctricos*, los estudiantes mencionan lo siguiente:

> "*Un capacitor, también conocido como condensador, es un componente fundamental en electrónica que almacena energía en forma de un campo eléctrico entre dos placas conductoras separadas por un dieléctrico. Además, que sus "Características principales" son:*

- Capacitancia (C): Capacidad de almacenamiento, depende del área de las placas y el material dieléctrico. Se mide en Faradios (F).
- Voltaje (V): Diferencia de potencial entre las placas.
- Carga (Q): Relación entre carga, capacitancia y voltaje: Q = C .V.
- Funcionamiento:
- Carga: Al aplicar un voltaje, se acumula carga en las placas creando un campo eléctrico en el dieléctrico.
- Descarga: La energía almacenada fluye hacia la carga conectada, equilibrando el voltaje.
- Permiten el paso de corrientes alternas y bloquean las corrientes continuas.

En relación a sus "Usos y Aplicaciones de Capacitores", mencionan que: *los capacitores tienen múltiples aplicaciones en circuitos electrónicos debido a su capacidad de almacenamiento temporal y control de energía: Circuitos de filtro; Circuitos osciladores; Circuitos de temporización; Circuitos amplificadores; Arranque de motores y en Cámaras fotográficas*.
En relación a las preguntas o dudas que les surgen a los estudiantes, ellos presentan las siguientes:

- *¿Qué materiales dieléctricos se usan comúnmente y cómo afectan al rendimiento de los capacitores?*
- *¿Cómo varía la vida útil de un capacitor en función de las condiciones ambientales, como la temperatura o la humedad?*
- *¿Qué nuevas tecnologías están surgiendo en el campo de los capacitores para mejorar su eficiencia energética?*
- *¿Qué es la capacitancia?*
- *¿Cómo puede ser conectado un capacitor?*
- *¿Qué riesgos existen al manipular capacitores?*
- *¿Cómo es posible que al producirse un campo eléctrico se pueda almacenar energía? Nos resulta un concepto verdaderamente abstracto.*
- *¿Tienen un límite de vida útil? ¿Se va desgastando su capacidad de almacenar energía?*

Resultados Parte 2:

En la Parte 2, todos los estudiantes logran presentar en detalle la deducción de la Ecuación Diferencial del fenómeno a partir de utilizar las leyes de Kirchhoff, brevemente explicadas por la docente de Física II, y su correcta resolución (utilizando herramientas teóricas de Matemática B), como es el método de separación de variables.
Luego resuelven correctamente la consigna que continúa, cargan en GeoGebra los datos observados en clase (duración de 45 segundos - Figura 5), utilizan la herramienta "Ajuste exponencial" en GeoGebra y obtienen la función ajuste: $f(t)=6.807 \cdot e^{-t/18.187}$. A continuación, utilizan tal función, para calcular el valor experimental: $\tau \approx 18.187$ s. y estiman el tiempo de descarga al 30 % y al 1 % de la carga inicial: obteniendo un tiempo de 20.78 seg. y de 79.49 seg. respectivamente. En conclusión: el tiempo de descarga para un 30% de la carga inicial es aproximadamente 1,2 veces la constante de tiempo (τ), y para un 1% es aproximadamente 4,6 veces la constante de tiempo.
En resumen, los resultados muestran que los estudiantes logran una comprensión sólida de los conceptos fundamentales sobre capacitores en la Parte 1 del trabajo, identificando su función, características y aplicaciones. Además, formulan preguntas que evidencian un interés genuino en el tema. En la Parte 2, los estudiantes deducen correctamente la ecuación diferencial de descarga de un capacitor aplicando las leyes de Kirchhoff y resuelven con el método de separación de variables. Luego, emplean GeoGebra para ajustar datos experimentales a una función exponencial, obteniendo valores coherentes con la teoría.

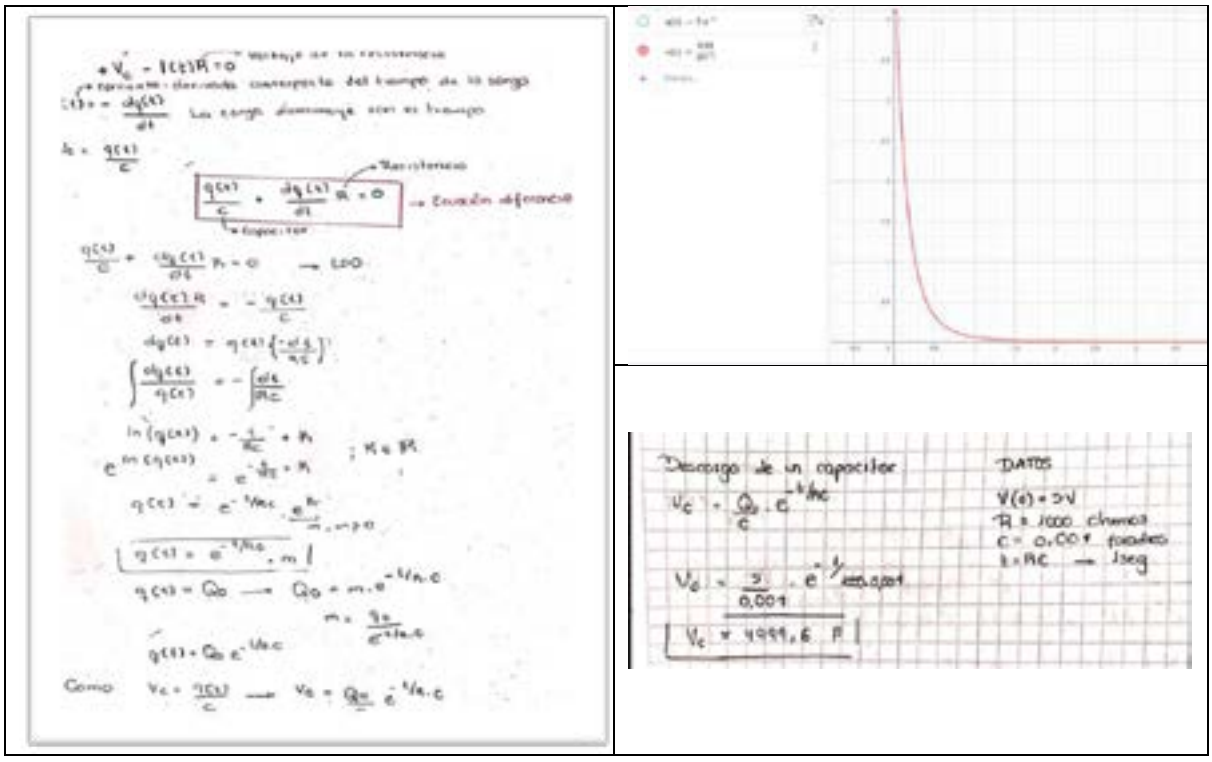


Figura 5: Algunas resoluciones de los estudiantes.

CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada evidencia la importancia de articular matemáticas, física y tecnología en la formación de ingenieros, facilitando la comprensión de fenómenos y el desarrollo de habilidades de modelado y resolución de problemas. A través del estudio de la descarga de un capacitor, los estudiantes aplicaron leyes de Kirchhoff y ecuaciones diferenciales en un contexto experimental real, mostrando motivación e interés en la actividad. La evaluación de los trabajos entregados refleja un manejo adecuado de los conceptos, aunque con diferencias en la precisión del análisis experimental. Esta iniciativa interdisciplinaria destaca la necesidad de que los docentes promuevan conexiones entre las materias para lograr aprendizajes más integrados y significativos.

BIBLIOGRAFÍA

Costa, V. (2025). Libro de Cátedra - Matemática B. Facultad de Ingeniería de la UNLP. https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/descargar.php?id=67111

Domínguez, A., De la Garza, J., Quezada-Espinoza, M., & Zavala, G. (2023). Integration of physics and mathematics in STEM education: Use of modeling. Education Sciences, 14(1), 20. https://www.mdpi.com/2227-7102/14/1/20?utm_source=chatgpt.com

Pepin, B., Biehler, R. & Gueudet, G. Mathematics in Engineering Education: a Review of the Recent Literature with a View towards Innovative Practices. Int. J. Res. Undergrad. Math. Ed. 7, 163–188 (2021). https://doi.org/10.1007/s40753-021-00139-8

Raviolo, A.; Álvarez, M. y Aguilar, A. (2011). La hoja de cálculo en la enseñanza de la Física: re-creando simulaciones. *Revista de Enseñanza de la Física*, 24 (1), pp. 97-107.

Serway, R. (1999). Física, volumen II, Mac Graw Hill

DIAGNÓSTICO SOBRE EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL ENTRE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA: RETOS Y OPORTUNIDADES EN EDUCACIÓN

Costa, Viviana; Pauletich, Fabiana y Trípoli, María de las Mercedes

Unidad de Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias- UIDET IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
vacosta@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los integrantes del Proyecto *"Articulación en las Ciencias Básicas para Carreras de Ingeniería"* y del Grupo de Investigación IMApEC del Departamento de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) han trabajado durante varios años en el diseño e implementación de actividades que favorezcan la articulación entre disciplinas, con un enfoque particular en la relación entre matemática y física. Estas actividades incorporan el uso de tecnología, el desarrollo de competencias y una visión interdisciplinaria de los contenidos. Estas propuestas de articulación han sido difundidas en congresos, jornadas y revistas especializadas en educación de las ciencias, a través de publicaciones y talleres ofrecidos por los miembros del grupo. En este contexto, también se han impulsado actividades de articulación dirigidas a estudiantes de la escuela secundaria, con el objetivo de fomentar la transición de los estudiantes a las carreras de ingeniería. Las investigaciones realizadas, junto con los estudios de posgrado llevados a cabo por los miembros del equipo, han permitido una constante actualización sobre teorías pedagógicas y enfoques contemporáneos sobre la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias, especialmente en el ámbito de las carreras de ingeniería, como el enfoque STEM. Más recientemente, el uso de la inteligencia artificial (IA) se ha expandido notablemente entre los estudiantes, y su integración en la enseñanza es ahora un tema central en diversos congresos especializados. Esto ha provocado que algunos de los integrantes del grupo y proyecto hayan incorporado la IA como un eje central para comprender y potenciar los procesos educativos.

La IA definida como una "*disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos que ejecutan operaciones comparables a las que realiza la mente humana, como el aprendizaje o el razonamiento lógico"* (Real Academia Española), se ha establecido como una herramienta revolucionaria en múltiples campos, incluida la educación. Específicamente, la inteligencia artificial generativa (IAG), rama de la IA, *"se ocupa de crear contenido nuevo a partir de datos existentes, como texto, imágenes, sonido o vídeo…y se basa en el uso de algoritmos, que son conjuntos de instrucciones que le indican a una computadora cómo realizar una tarea específica…*mediante el uso de*… redes neuronales artificiales, que son modelos matemáticos inspirados en el funcionamiento del cerebro humano" (González, Portillo y Zangara, 2024),* permitiendo aprender de los datos y generar contenido original. Esta capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y personalizar el aprendizaje ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la enseñanza, especialmente en disciplinas complejas como matemáticas y física.

Desde la aparición de ChatGPT (acrónimo del inglés Chat Generative Pre-Trained) desarrollado por OpenAI en noviembre de 2022, se ha observado "*un aumento exponencial en el uso de la inteligencia artificial en todos los ámbitos. Aunque ChatGPT es solo una de las muchas tecnologías generativas de inteligencia artificial, su impacto en los procesos de enseñanza y aprendizaje ha sido notable*."*(González, Portillo y Zangara, 2024)*. En este contexto, como menciona Moreno Padilla (2019), no debemos ver la aparición de la IA como un enemigo, sino como un posible campo de estudio, herramienta de uso, posibilitadora de nuevas estrategias para el aprendizaje y generadora de nuevas preguntas para la investigación educativa.

En el ámbito de la educación superior, la IAG no sólo proporciona recursos que pueden facilitar la comprensión de conceptos teóricos y prácticos, sino que también plantea interrogantes sobre cómo los docentes y estudiantes se relacionan con estas tecnologías en su proceso de construcción del conocimiento. En lugar de prohibir estas herramientas, el debate debería centrarse en cómo aprovecharlas para explorar nuevas posibilidades. Es un desafío incorporar al aprendizaje el uso de estas tecnologías en los planes de estudio y adaptar la enseñanza para maximizar el aprendizaje de estudiantes y docentes (García Peñalvo, Llorens Largo y Vidal, 2024), pues justamente "*la IA no reemplaza a los educadores humanos, sino que puede ser una herramienta útil para complementar el proceso de enseñanza y mejorar el aprendizaje de los estudiantes*" (González Gónzález, 2023).
Por lo tanto y con el fin de estar al tanto de las últimas tendencias en educación y comprender cómo los estudiantes utilizan la IA en su proceso de aprendizaje, se decidió llevar a cabo una investigación preliminar mediante la realización de un diagnóstico sobre el uso que los estudiantes de la FI de la UNLP hacen de la IA.

METODOLOGÍA

Durante el segundo semestre de 2024 se inició una investigación exploratoria mediante el diseño de una encuesta con el objetivo de saber el nivel de conocimiento y uso de herramientas de IA entre los estudiantes de carreras de ingeniería en la UNLP, así como su percepción sobre la utilidad de estas herramientas en su proceso de aprendizaje. A través de las preguntas, se buscó obtener información sobre la frecuencia con que los estudiantes utilizan la IA, las herramientas específicas que emplean, y cómo integran estas tecnologías en su estudio. Además, la encuesta indaga sobre la disposición de los estudiantes para participar en actividades o clases que incorporen IA, y su interés en que los docentes utilicen estas herramientas en las clases. El propósito fue recopilar datos que ayuden a comprender cómo la IA puede mejorar o transformar la enseñanza y el aprendizaje en el ámbito universitario y definir el tema de investigación.
Para la elaboración de la encuesta, se consideraron los objetivos establecidos y el propósito de la investigación. Se diseñó un conjunto de preguntas de opción múltiple, permitiendo en algunos casos que los estudiantes pudieran escribir sus respuestas si no encontraban una opción adecuada. La encuesta fue creada utilizando un Formulario de Google y el enlace fue distribuido entre diversos grupos de estudiantes de la facultad, quienes debían completarla de manera anónima.
Para analizar la información obtenida, a partir de las respuestas de los estudiantes, se organizaron los datos en tres grupos según la edad reportada por los participantes. Posteriormente, dentro de cada uno de estos grupos, se identificó el subgrupo de estudiantes que indicaron tener conocimientos básicos de informática y a partir de ellos se fueron generando distintas categorías de análisis. En este trabajo, el estudio se centra en los estudiantes con conocimientos básicos en informática, con el objetivo de evaluar sus respuestas de manera más detallada. La razón detrás de esta elección radica en que los estudiantes con conocimientos intermedios o avanzados probablemente ya utilizan herramientas de IA de forma regular, lo cual podría sesgar los resultados al no reflejar una experiencia más general o accesible. En cambio, los estudiantes con conocimientos básicos representan un grupo cuya interacción con la IA podría ser más limitada o reciente, lo que permite obtener una visión más amplia sobre cómo este grupo interactúa con nuevas tecnologías en comparación con aquellos que tienen un dominio más profundo de la informática.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La encuesta fue respondida por un total de 199 estudiantes de las carreras de ingeniería. En las primeras preguntas, se les consultó sobre la rama de la ingeniería a la que pertenecen y su edad. Con base en esta última variable, los participantes fueron agrupados en tres categorías específicas.

- **Grupo A:** 79 estudiantes con edades comprendidas entre los 18 y 19 años.
- **Grupo B:** 77 estudiantes con edades comprendidas entre los 20 y 21 años.
- **Grupo C:** 43 estudiantes con edades superiores a los 22 años.

Dentro de cada grupo, se analizaron las respuestas a la pregunta: *¿Cuál es tu nivel de conocimiento en temas de programación e informática?* Los resultados se presentan en la Figura 1.

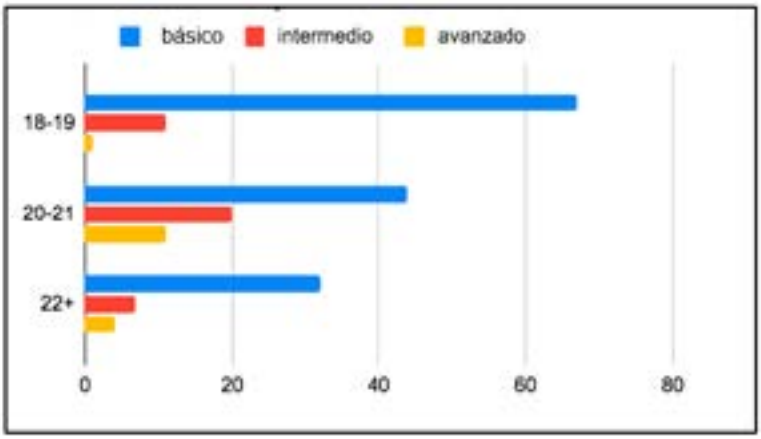


Figura 1: Nivel de conocimiento en informática según la edad de los estudiantes.

Para este estudio, se consideraron especialmente las respuestas de los estudiantes que manifestaron tener conocimientos básicos en esta área. A continuación, se les preguntó:

¿Conoces y has usado herramientas de Inteligencia Artificial (IA)?

A quienes respondieron afirmativamente, se les consultó sobre la frecuencia de uso. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Uso de la IA, de estudiantes con nivel básico de conocimiento en informática, según la edad.

Edad	Siempre	Frecuentemente	Ocasionalmente	Total
18-19	10	31	23	64
20-21	5	20	19	44
22+	5	8	19	32

A continuación, se analizaron específicamente las respuestas a las preguntas:

¿Cuáles herramientas de IA has utilizado?
¿Para qué tareas soles utilizar la IA en tu estudio?
¿Consideras que la IA te ayuda a mejorar tu aprendizaje y comprensión de los temas?
¿Estarías interesado en participar en clases o actividades que incorporen herramientas de IA?
¿Te gustaría que los docentes integren el uso de herramientas de IA en las clases?

De los 64 estudiantes del Grupo A (18-19 años) con conocimientos básicos en informática que utilizan IA, el 100% emplean ChatGPT. La mayoría utiliza la IA para resolver dudas teóricas (89.1%) y también la mayoría (79.7%) considera que la IA mejora su aprendizaje. En cuanto a la frecuencia de uso, el 48.4% la utiliza frecuentemente, mientras que el 36% lo hace ocasionalmente. La integración de la IA en sus estudios es considerada fácil por el 95.3% de los estudiantes.

Los 44 estudiantes del Grupo B (20-21 años) con conocimientos básicos en informática que utilizan IA, indicaron que usan ChatGPT. La mayoría de ellos utiliza la IA frecuentemente (45,5% lo hace con frecuencia, 43,2% ocasionalmente), y también la mayoría la usa principalmente para resolver dudas teóricas (88,6%). En cuanto a su impacto en el aprendizaje, el 75% de los estudiantes afirma que la IA les ayuda a mejorar su comprensión de los temas. Además, el 93,2% considera que integrar la IA en sus estudios es fácil. En referencia al grupo C (más de 22 años), de los 32 estudiantes con conocimientos básicos en informática que afirmaron usar IA, el 46,7% utilizan exclusivamente ChatGPT, mientras que los demás emplean también otras herramientas. En cuanto a la frecuencia de uso, el 16,7% la utilizan siempre, el 26,7% frecuentemente y el 63,3% ocasionalmente. La mayoría (90%) la emplea para resolver dudas teóricas, entre otros usos. En cuanto al impacto en el aprendizaje, el 73,3% considera que la IA les ayuda, mientras que el 33,3% no está seguro. Respecto a la facilidad de integración de la IA en sus estudios, el 60% considera que les resulta fácil incorporarla. Con respecto al interés por participar en clases o actividades que utilicen IA y que los docentes la integren a sus clases, se puede observar en la Tabla 2 la comparación de los tres grupos de estudiantes de acuerdo con la edad.

Tabla 2: Interés en clases con IA y que los docentes utilicen IA en sus clases, según los estudiantes con nivel básico de conocimiento en informática, que utilizan IA, según la edad.

Grupo de Edad	Interés en Clases o actividades con IA	Estudiantes interesados en que los docentes usen IA
18-19 años	27 (Si), 26 (Tal vez), 11 (No)	20 (Si), 31 (Tal vez), 13 (No)
20-21 años	20 (Si), 19 (Tal vez), 5 (No)	15 (Si), 21 (Tal vez), 8 (No)
22+ años	17 (Si), 12 (Tal vez), 3 (No)	18 (Si), 9 (Tal vez), 5 (No)

A continuación, se presentan los hallazgos clave, destacando tanto las similitudes como las diferencias entre los grupos:

I. Uso de la IA

- En los Grupos A y B, todos los estudiantes que usan IA indicaron que emplean ChatGPT, lo que sugiere que esta herramienta es la más popular y accesible para los participantes. En el Grupo C, aunque la mayoría también usa ChatGPT, hay una mayor diversidad en las herramientas utilizadas.
- El uso de IA para resolver dudas teóricas es común en todos los grupos, con una alta proporción de estudiantes (más del 80%) que la utilizan principalmente con este fin. Esta tendencia podría ser un indicador de que los estudiantes valoran la IA como un recurso clave para clarificar conceptos académicos, en el apoyo a la comprensión teórica.

II. Frecuencia de uso

La frecuencia de uso de la IA varía ligeramente entre los grupos. En los Grupos A y B, aproximadamente la mitad de los estudiantes utiliza la IA con frecuencia (48,4% para el caso del Grupo A y 45,5% para el grupo B). El Grupo C presenta una frecuencia de uso menor, un 16,7% de estudiantes la usan siempre y un 63,3%, de manera ocasional. Esta diferencia puede deberse a factores como el año de estudio, la carga académica o la percepción de la utilidad de la herramienta.

III. Impacto en el aprendizaje

En los tres grupos, la mayoría de los estudiantes consideran que la IA mejora su

aprendizaje y comprensión de los temas, con un porcentaje superior al 70% en todos los casos. En el Grupo A, este impacto es reconocido por el 79,7% de los estudiantes, mientras que, en el Grupo B, un 75% considera que la IA les ayuda en su comprensión. En el Grupo C, el 73,3% tiene una opinión similar. Sin embargo, el Grupo C presenta una proporción más alta de estudiantes que no están seguros de los efectos de la IA (33,3% frente a un 12%/18% en los otros dos grupos), lo que podría sugerir una falta de familiaridad o una percepción menos clara de los beneficios de la IA en su aprendizaje.

IV. Facilidad de integración

En términos de la facilidad para integrar la IA en los estudios, la mayoría de los estudiantes considera que es sencillo incorporarla. Este porcentaje es especialmente alto en el Grupo A (95,3%) y el Grupo B (93,2%), mientras que en el Grupo C este porcentaje es más bajo (60%). Esto podría reflejar una mayor experiencia o familiaridad con la IA en los primeros dos grupos, mientras que el Grupo C, con una proporción menor de usuarios de IA, podría estar experimentando más desafíos en la incorporación efectiva de esta herramienta en su proceso académico.

V. Interés en actividades y clases con IA

- A pesar del uso frecuente de la IA y de los beneficios percibidos en su aprendizaje, el interés en participar en actividades o clases que incorporen IA es moderado en todos los grupos. En el Grupo A, sólo el 42,2% de los estudiantes expresó interés en participar en actividades con IA, y el porcentaje es ligeramente superior en el Grupo B (45,5%) y el Grupo C (56,7%). Aunque hay interés en usar la IA, muchos estudiantes parecen preferir su uso individualizado para resolver dudas, en lugar de incorporarla a actividades académicas más estructuradas.
- Cuando se les preguntó específicamente sobre la integración de la IA en las clases por parte de los docentes, el porcentaje fue subiendo a medida que subía la edad de los entrevistados, quedando explícita la preferencia de los alumnos más nuevos en la universidad por utilizar la IA de forma autónoma.

En síntesis, los estudiantes con conocimientos básicos en informática de los tres grupos coinciden en el uso del ChatGPT y consideran que esta herramienta es útil para mejorar su comprensión teórica. Esto refleja un claro interés y aprovechamiento de las tecnologías emergentes para optimizar su aprendizaje, especialmente en áreas como la resolución de dudas teóricas y la profundización en conceptos complejos. Sin embargo, el Grupo C presenta más reservas sobre su uso, lo que sugiere que podrían tener una menor familiaridad o preparación para integrarla efectivamente en sus estudios.

La mayoría de los estudiantes reconoce el impacto positivo de la IA en su comprensión de los temas, lo que refuerza la idea de que la tecnología puede ser una aliada poderosa en el proceso de aprendizaje, al ofrecer apoyo personalizado y accesible en tiempo real.

Sin embargo, la percepción de la facilidad para integrar la IA en el estudio varía significativamente entre los grupos, y el Grupo C presenta más reservas y dificultades al intentar incorporarla. Esto podría reflejar una falta de familiaridad o preparación para utilizar estas herramientas de manera óptima. Este aspecto sugiere que, aunque la IA tiene un gran potencial, su integración exitosa en el proceso educativo depende de que los estudiantes estén adecuadamente capacitados en su uso.

Además, aunque los estudiantes valoran el uso de la IA, su interés en actividades o clases que la integren es moderado. Esto indica que, a pesar de la utilidad percibida de estas herramientas, muchos prefieren mantener su uso de manera individualizada, como apoyo adicional fuera del aula. Esta tendencia también podría reflejar resistencia al cambio o una preferencia por métodos tradicionales de enseñanza. Este fenómeno representa un desafío para los docentes que desean incorporar la IA en sus clases de manera efectiva, lo que requiere una planificación cuidadosa y un enfoque gradual para familiarizar a los estudiantes con su uso dentro de un contexto académico.

CONCLUSIÓN

En conclusión, el uso de la IA entre los estudiantes de ingeniería y su posible incorporación al proceso de enseñanza y aprendizaje sugiere un panorama complejo y lleno de oportunidades, pero también de desafíos. La IA tiene el potencial de transformar la educación, especialmente en carreras como ingeniería, donde los conceptos complejos y la resolución de problemas son constantes. No obstante, su integración efectiva en el proceso de enseñanza y aprendizaje requiere no solo el acceso a la tecnología, sino también una preparación adecuada tanto de los docentes como de los estudiantes. Esto es esencial para asegurar que la IA se utilice de manera que potencie y complemente los métodos educativos tradicionales, en lugar de reemplazarlos. La clave estará en cómo se diseñen las estrategias pedagógicas para incorporar la IA de manera que sea percibida como una herramienta útil y no como una imposición. Los hallazgos anteriormente mencionados dieron lugar a una serie de interrogantes que reflejan tanto la complejidad como el potencial de la IA en la educación superior, especialmente en áreas como matemática y física, donde su aplicación tiene el poder de transformar las metodologías de enseñanza y aprendizaje. Entre estas preguntas se incluyen: ¿Cómo puede la IA personalizar y/o potenciar el aprendizaje en disciplinas como física y matemáticas? ¿De qué manera puede la IA asistir a los docentes en la enseñanza de estas asignaturas, en la creación de materiales didácticos, la sugerencia de estrategias pedagógicas basadas en datos y la reducción de tareas administrativas, permitiéndoles centrarse en el proceso de enseñanza? ¿Cómo puede la IA mejorar la evaluación del aprendizaje en estas disciplinas, proporcionando retroalimentación más rápida y precisa? ¿Qué habilidades deben desarrollar los estudiantes para interactuar de manera efectiva con herramientas basadas en IA y aprovechar su potencial educativo? ¿Cómo puede la IA contribuir a la actualización y relevancia de los contenidos curriculares en física y matemáticas, adaptándolos a las nuevas demandas del mundo digital y tecnológico? Este estudio debe considerarse como un primer acercamiento exploratorio al uso de la inteligencia artificial entre los estudiantes de ingeniería. Aunque se centró en una población específica de estudiantes con conocimientos básicos en informática, sería relevante continuar con investigaciones que amplíen el perfil de los participantes, incluyendo a aquellos con diferentes niveles de conocimiento tecnológico. Además, aunque el uso exclusivo de ChatGPT reflejó la herramienta más comúnmente empleada, futuras investigaciones podrían explorar otras aplicaciones de IA y su impacto en el proceso educativo. Sería también útil utilizar herramientas de análisis más diversas y realizar estudios a largo plazo para comprender mejor las dinámicas del uso de la IA en el aprendizaje y su integración en el entorno académico. Este estudio proporciona una base valiosa, pero abre la puerta a un abanico de posibilidades para profundizar en el tema y obtener conclusiones más completas, que esperamos abordar en el marco del proyecto y del grupo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

García Peñalvo, F., Llorens Largo, F. y Vidal, J. (2024). La nueva realidad de la educación ante los avances de la inteligencia artificial generativa. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia (RIED)*, 27(1), 9-39.

González González, C. S. (2023). El impacto de la inteligencia artificial en la educación: transformación de la forma de enseñar y de aprender. *Revista Qurriculum*, 36, 51-60.

González, A., Portillo, J. J. y Zangara, M. A. (2024). La Inteligencia Artificial Generativa en la Enseñanza Media. Propuesta de formación de docentes, *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología* (*TEyET),* 37, 78-88.

Moreno Padilla, R. D (2019). La llegada de la inteligencia artificial a la educación. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 7(14), 260-270.

ARTICULACIÓN ENTRE MATEMÁTICA Y FÍSICA: LA EXPERIENCIA DE LOS ESTUDIANTES A TRAVÉS DE ENTREVISTAS

Trípoli, María de las Mercedes y Torroba, Patricia

Unidad de Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias- UIDET IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
mercedes.tripoli@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación y Desarrollo Acreditado de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP): “Articulación en la enseñanza de las Ciencias Básicas en carreras de Ingeniería”.
Equipos de trabajo conformados por docentes de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNLP e integrantes del mencionado proyecto, han estado diseñando y desarrollando actividades de articulación entre materias del área de ciencias básicas, como matemática y física, así como con otras asignaturas tecnológicas básicas. Estas actividades se fundamentan en la dificultad que enfrentan los estudiantes para relacionar los temas enseñados en una asignatura con conceptos similares estudiados en otras.
Cada área del conocimiento utiliza un lenguaje, terminología y nomenclatura propios, lo que representa un desafío significativo para los estudiantes universitarios en sus primeros años. En su mayoría, aún no cuentan con la capacidad de establecer estas conexiones por sí mismos. Además, es importante tener en cuenta que, en el caso de los estudiantes de ingeniería, la matemática debe concebirse como una herramienta para resolver problemas prácticos, más que como un fin en sí misma. Según Santaló (1994), los futuros ingenieros requieren una comprensión intuitiva de los conceptos matemáticos que les permita identificar cuándo y cómo aplicarlos de manera efectiva.
Por lo tanto, la articulación entre asignaturas debe orientarse a facilitar esa comprensión y aplicación de la matemática, utilizando un lenguaje común y una metodología coherente que garantice la continuidad lógica del aprendizaje. De esta manera, los estudiantes podrán utilizar los conocimientos adquiridos en una asignatura dentro del contexto de otra, evitando la fragmentación del conocimiento y favoreciendo la integración, transferencia y la relación de los aprendizajes (Barranquero y Rocca, 2014). Así, entendemos la articulación como los esfuerzos necesarios entre distintas asignaturas para lograr un diálogo que facilite el tránsito de los alumnos, mediante el uso de un lenguaje común que permita reconocer los objetos comunes en las distintas asignaturas, presentados en formatos diferentes y una metodología coherente que unifique las “reglas de juego”. Este tipo de articulación debe garantizar una continuidad lógica y natural en el proceso de enseñanza y aprendizaje.
La articulación entre disciplinas es esencial para lograr este objetivo, especialmente en carreras como ingeniería, que son inherentemente interdisciplinarias. La implementación de actividades que conecten distintas áreas del conocimiento puede ayudar a los estudiantes a comprender que los fenómenos no existen de manera aislada, promoviendo una visión integrada y científica del mundo (Gascón, 2009; Páez, 2011). De este modo, se avanza en la formación de estudiantes capaces de integrar las matemáticas y la física de manera efectiva, contribuyendo a la resolución de problemas prácticos en su futuro profesional.
Dentro de las actividades llevadas a cabo por los integrantes del proyecto, se han desarrollado propuestas que relacionan el tema de “magnitudes vectoriales” estudiado en Matemática A con conceptos vinculados a Física I. Ambas asignaturas forman parte del primer año de los planes de estudio de todas las carreras de la Facultad, siendo Matemática A del primer semestre y Física I del segundo. Las propuestas variaron según las experiencias adquiridas en su desarrollo y el contexto en el que se realizaron, incluyendo la cantidad de alumnos en el aula,

la especialidad de ingeniería cursada, y las circunstancias de la prepandemia, pandemia y postpandemia (Torroba, Trípoli, Devece y Aquilano, 2017; Torroba, Trípoli, Devece y Aquilano, 2019; Torroba y Trípoli, 2021, Trípoli y Torroba, 2023; Trípoli, Torroba y Taday, 2023), entre otras variables emergentes. En este trabajo, no se enfoca la atención en las actividades realizadas, sino que se analizan las percepciones de los estudiantes a través de entrevistas individuales semiestructuradas, sobre una de las actividades desarrolladas durante la postpandemia, que de ahora en adelante la denominaremos la *Actividad*. Al conocer las opiniones de los estudiantes, se busca reflexionar sobre la implementación de este tipo de actividades de articulación y evaluar su utilidad, dado que la articulación entre estas disciplinas no solo permite a los estudiantes conectar diferentes áreas de conocimiento, sino que también fomenta un aprendizaje más significativo al aplicar conceptos matemáticos a situaciones físicas concretas.

Contextualización de las entrevistas realizadas

Breve relato de la *Actividad*:

La *Actividad* se realizó en una comisión de Matemática A de la FI de la UNLP, durante el primer cuatrimestre del año 2022. El objetivo fue profundizar en el estudio de las magnitudes vectoriales. La participación fue optativa. De un total de 54 estudiantes asistentes a las clases, se inscribieron 16 y fueron 12 los que completaron la *Actividad* en todas sus instancias. El trabajo se centró en la suma de vectores, su representación gráfica, las distintas notaciones y lenguajes, así como en situaciones físicas concretas y se estructuró para facilitar un enfoque práctico y colaborativo.
La *Actividad* consistió en dos encuentros presenciales y uno virtual en un período de tres semanas, cada uno con una duración de entre una hora y hora y media, fuera del horario de clases. Fue coordinada por la profesora de Matemática A y la de Física I, y colaboró otro profesor de Física I para la parte experimental y un becario que apoyó a los estudiantes durante el recorrido
En el primer encuentro, se presentó una experiencia práctica sobre la posibilidad de colocar una soga con una pesa en su parte media en forma horizontal, que se analizó mediante la suma de vectores. En el segundo encuentro, se introdujo la magnitud vectorial 'cantidad de movimiento' y se plantearon tres situaciones experimentales de choques de móviles, verificando los resultados obtenidos previamente de manera teórica (Figura 1). Los estudiantes trabajaron en grupo para resolver una cuarta situación, que se discutió en el pizarrón, y además se planteó una tarea adicional. El tercer encuentro, virtual, se dedicó a devolver todas las tareas.



Figura 1. Fotos de dos momentos de la *Actividad* optativa realizada en Matemática A

Se propusieron cuatro tareas grupales a lo largo de la *Actividad*: la primera consistió en realizar una suma de vectores para compararla con la resolución en Física I, la segunda implicaba resolver ejercicios desde la perspectiva física, la tercera abordaba choques de móviles utilizando la suma de vectores y la última presentaba una situación más compleja a resolver después del segundo encuentro.

Encuesta final de la *Actividad*

Al finalizar la *Actividad*, se pidió a los estudiantes que completaran una encuesta anónima para analizar su experiencia, ya que son los principales participantes. Se les instó a responder con sinceridad y a tomarse el tiempo necesario, dado que sus respuestas son fundamentales para el análisis de las experiencias implementadas. De los 12 estudiantes que participaron, 9 completaron la encuesta, la cual se dividió en tres partes: sobre los 3 encuentros, sobre las 4 tareas propuestas y sobre la actividad en general.
En la sección de preguntas referidas a los encuentros, se proporcionó un espacio para que los estudiantes compartieran sus impresiones sobre la explicación, el desarrollo experimental, las diferencias entre las notaciones de matemática y física, el tiempo dedicado y la tarea realizada en clase, así como cualquier otro comentario relevante.
En la parte de las preguntas relacionadas con las tareas, se pidió a los estudiantes que indicaran la dificultad de los ejercicios y su método de resolución. Si un ejercicio se resolvió en el encuentro, se preguntó si consideraban útil esa modalidad. También se indagó si las tareas les ayudaron a relacionar el tratamiento de los vectores en física y matemática.
En cuanto a la *Actividad* en general, se preguntó si consideraban interesante el tema elegido, la importancia de realizar actividades de este tipo en Matemática A para vincular la matemática con situaciones concretas de otras áreas, como la física, y qué les aportó la *Actividad*. En todas las preguntas, se dejó un espacio para que los estudiantes expresaran sus opiniones.
Las respuestas fueron mayoritariamente positivas, con los alumnos ofreciendo justificaciones detalladas que reflejaban tanto las dificultades como los aspectos motivadores de la *Actividad*.

La entrevista: la voz de los estudiantes

Como se mencionó anteriormente, a través de la comprensión de las experiencias y opiniones de los estudiantes, se busca identificar cuáles aspectos de la *Actividad* resultaron más efectivos, garantizando así que estas iniciativas contribuyan significativamente al aprendizaje y a la integración de conocimientos en sus respectivas disciplinas.
La realización de la encuesta al finalizar la *Actividad* proporcionó información valiosa sobre las dificultades y los aspectos motivadores. Sin embargo, dado que la *Actividad* se centró en la articulación de conceptos matemáticos y físicos, y los estudiantes aún no habían cursado Física I (materia correlativa a Matemática A), se consideró pertinente conversar con ellos una vez completado dicho curso (asistir regularmente a clase, participar activamente en las tareas propuestas por los docentes y rendir los exámenes correspondientes). Esta decisión llevó al uso de la entrevista como estrategia, ya que, según Piovani (2007), se configura como un encuentro destinado a recolectar información específica en el contexto de una investigación. Este método es especialmente útil para obtener datos cualitativos, ya que permite explorar hechos no directamente observables, como las opiniones de los estudiantes (Verd Pericás y Lozares Colina, 2016).
Se optó por realizar las entrevistas de forma personal (cara a cara) y con un enfoque semiestructurado o focalizado. En este tipo de entrevista, los entrevistados (los estudiantes) han participado en una situación social (la *Actividad* de articulación) cuya experiencia subjetiva se convierte en el foco de la entrevista (Piovani, 2007). Las entrevistas semiestructuradas se basan en un diseño de investigación previamente planificado que incluye un guión flexible con preguntas abiertas, permitiendo al entrevistador profundizar en ciertos aspectos según la evolución de la conversación. Durante la entrevista, el entrevistador debe estar atento a las respuestas del entrevistado, lo que permite que estas guíen el flujo de la conversación y genere nuevas preguntas y profundizaciones espontáneas. Esta técnica, por tanto, facilita la obtención

de una rica variedad de información y la clarificación de respuestas en un marco de interacción más directo y flexible (Verd y Lozares, 2016).

Metodología

Las entrevistas se llevaron a cabo a mediados del mes de abril del año 2023, cuando los estudiantes estaban cursando Física II y Matemática C, entre otras asignaturas. Se contactó a los alumnos mediante un correo electrónico en el que se explicaba el motivo del mensaje. De los 9 que completaron la encuesta, 5 participaron de las entrevistas. Todos los entrevistados habían promocionado tanto Matemática A como Física I. Las entrevistas se realizaron el mismo día, y se estimó un tiempo de duración de 15 minutos para cada una de ellas, organizando las citas en consecuencia.

Dado que se eligió la entrevista semiestructurada, se diseñó una serie de preguntas. Las primeras consistieron en cuestiones generales, para luego focalizarse en interrogantes más específicos relacionados con el objeto de estudio de esta investigación, lo cual constituye una de las características distintivas de este tipo de entrevistas (Tabla 1).

Tabla 1. Preguntas iniciales pautadas para las entrevistas

Durante la cursada de Física I, ¿recordaste en algún momento la Actividad optativa realizada en Matemática A sobre magnitudes vectoriales?
¿Considerás que te fue útil haber visto en la *Actividad* Optativa las distintas notaciones vectoriales que se utilizan en Física I?
Considerando que ya aprobaste Física I, ¿te parece que valió la perna haber participado de la *Actividad* optativa?

El proceso de análisis de las entrevistas consistió en varias escuchas de las grabaciones considerando, no sólo el contenido verbal sino el tono, pausas y otras expresiones no verbales que se consideraron relevantes, con toma de notas sobre impresiones generales, temas que surgieron y patrones iniciales observados.

De acuerdo con las preguntas formuladas durante la entrevista, tanto las iniciales como aquellas que fueron surgiendo a lo largo de las mismas, las respuestas fueron codificadas en cinco categorías, según se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Categoría de análisis de las entrevistas

Relación entre Matemática A y Física I a través de la *Actividad* optativa
Percepción de la utilidad de la notación vectorial
Valoración de la Actividad optativa
Relación entre Matemática A y Física I a través de otros temas comunes
Vinculación entre Matemática B y Física II

Resultados y análisis

Las categorías propuestas permitieron organizar las entrevistas de manera que se pudieran identificar patrones comunes y divergentes entre los estudiantes, facilitando así un análisis más estructurado y detallado.

Relación entre Matemática A y Física I a través de la *Actividad* optativa: todos los estudiantes manifestaron haber recordado la *Actividad*, la cual la asociaron con la aparición en Física I de conceptos tales como choques elásticos y plásticos, y cantidad de movimiento y su conservación. De acuerdo con sus comentarios, por haber utilizado el mismo material didáctico en ambas oportunidades. Mientras algunos recordaron los detalles de la actividad otros no lo hicieron de inmediato. Se puede concluir que esto resalta la efectividad de la *Actividad* como un puente entre ambas disciplinas, contribuyendo a la comprensión de conceptos físicos. La coincidencia en el material didáctico utilizado refuerza la idea de que la aplicación de recursos comunes puede facilitar la transferencia de conocimientos entre las distintas áreas.

Percepción de la utilidad de la notación vectorial: en cuanto la notación utilizada en ambas materias, los estudiantes consideraron que les fue beneficioso haber trabajado con ella en la *Actividad.* Sin embargo, la facilidad con la que algunos estudiantes lograron transferir la notación de Matemática A a Física I no fue homogénea. Algunos encontraron natural el traspaso de notación, mientras que a otros no les resultó tan fácil. Un estudiante propuso la idea de incorporar de manera más general (no solamente en actividades especiales) la notación de versores en la cursada de Matemática A, lo que refleja la importancia de un enfoque más coherente y alineado con la notación que se utiliza en Física, la cual resulta más práctica para la resolución de problemas.

Valoración de la *Actividad* optativa: en general los estudiantes coincidieron en que la participación en la *Actividad* valió la pena, aunque la percepción de su utilidad varió. Algunos la valoraron por darle sentido a lo que estudiaban en Matemática A, mientras que otros consideraron que su mayor utilidad se mostró en el contexto de Física I. Para algunos, la *Actividad* ayudó a superar temores frente a nuevos temas, al brindarles una perspectiva más completa, mientras que otros, inicialmente escépticos, reconocieron que la actividad les ofreció un enfoque adicional y práctico que favoreció su aprendizaje. Este punto subraya la importancia de crear experiencias educativas que no solo enseñen contenidos, sino que también ayuden a los estudiantes a ganar confianza en sus capacidades.

Relación entre Matemática A y Física I a través de otros temas comunes: algunos estudiantes manifestaron que los contenidos de Matemática A, como la derivada, fueron útiles para entender mejor algunos conceptos de Física I, como la velocidad y aceleración. Esto indica que la formación matemática previa puede facilitar la comprensión de conceptos físicos, aunque no todos los estudiantes hayan sido conscientes de esta conexión. Cuando se les preguntó sobre la relación entre el Movimiento Armónico Simple (MAS) en Física I y los temas estudiados en Matemática A, los estudiantes en su mayoría no lograron hacer la conexión entre las funciones circulares de Matemática A y el MAS. Este resultado sugiere que, aunque los contenidos de Matemática A son relevantes para ciertos aspectos de Física I, algunos conceptos pueden no haber sido suficientemente destacados en el contexto de Matemática A o pueden requerir un enfoque más explícito para facilitar la conexión entre las disciplinas.

Vinculación entre Matemática B y Física II: los estudiantes mencionaron que sus docentes de Física II establecieron vínculos entre los temas y notaciones que utilizaban en Matemática B, lo que puede haber facilitado la comprensión de los contenidos. Esto sugiere que la vinculación explícita que realicen los docentes es clave para que los estudiantes puedan establecer relaciones más claras y directas con los temas, lo que refuerza la importancia de la interdisciplinariedad en la enseñanza.

En resumen, el análisis de las entrevistas se centró en identificar patrones y discrepancias en las respuestas de los estudiantes según las categorías propuestas. A partir de la codificación y agrupación de las respuestas se interpretó que, aunque la actividad fue generalmente valorada en forma positiva, algunos estudiantes tenían dudas iniciales sobre su utilidad. El uso de las mismas herramientas didácticas facilitó el reconocimiento de la *Actividad* realizada previamente en la asignatura Matemática A. La variabilidad en el traspaso de notación entre Matemática A y Física I, así como la dificultad para conectar ciertos temas, sugiere que los estudiantes podrían necesitar un enfoque más guiado y explícito en la integración de los contenidos de ambas disciplinas. También se observó que el aprendizaje interdisciplinario fue una herramienta efectiva para la comprensión de temas complejos, lo que refuerza la importancia de facilitar este tipo de conexiones entre materias.

A manera de conclusión

Este trabajo se enfoca en el análisis de entrevistas semiestructuradas realizadas a estudiantes universitarios que participaron en una experiencia educativa centrada en la articulación entre

matemática y física. Esta estrategia de recolección de datos fue empleada por primera vez por las autoras, y se utilizó para evaluar el impacto de la actividad en la trayectoria educativa de los estudiantes a medida que avanzaban en sus estudios universitarios.
El análisis de las entrevistas proporcionó una visión detallada de las experiencias y ofreció recomendaciones para mejorar las prácticas educativas. A través de estas entrevistas, se identificaron áreas para revisar, lo que permite diseñar actividades más adaptadas a las necesidades de los estudiantes. Aunque los resultados son específicos de una población particular, las opiniones recabadas pueden extrapolarse a otros grupos en contextos similares.
La metodología de entrevista también permitió a las docentes reflexionar sobre su rol y mejorar sus enfoques pedagógicos. Además, el proceso ofreció una oportunidad para que los estudiantes se expresaran libremente, contribuyendo a un ambiente de aprendizaje más inclusivo.
Los resultados resaltan la importancia del trabajo interdisciplinario y la introducción temprana de notaciones y problemas matemáticos en materias previas, para facilitar una integración de contenidos de Matemática y Física y promover un currículo más pertinente y adaptado a las necesidades de los estudiantes.

Bibliografía

Barranquero, M. y Rocca, M. (2014). Fragmentación vs. integración en la construcción de conocimientos.En Estrategias de articulación e integración de conocimientos en la FAU. Experiencias al 2013. La Plata: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, UNLP.
Gascón, J. (2009). El problema de la Educación Matemática entre la Secundaria y la Universidad. Edu-cação Matemática Pesquisa, 11(2), 273-302.
Páez, O. (2011). Las competencias para el ingreso y para la permanencia en el primer año de las carreras de ingeniería, una mirada integradora desde una actividad profesional. I Jornada de Enseñanza de la Ingeniería. Facultad Regional Buenos Aires, Sede Campus. Libro de Resúmenes.
Piovani, J. I. (2007). Capítulo 12: La entrevista en profundidad, en Metodo*logía de las Ciencias Sociales,* de Marradi, A., Archenti, N. y Piovani, J. I. Buenos Aires: Emecé Editores.
Santaló, L. (1994). Matemática para no matemáticos. En: Parra, C. y Saiz, I. Didáctica de Matemáticas. Aportes y reflexiones. Buenos Aires: Paidós.
Torroba P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2017). Magnitudes vectoriales: una propuesta didáctica para articular matemática y física. *Revista de la enseñanza de la Física*, 29 (Extra), 305-313.
Torroba, P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2019). Implementación de una propuesta sobre vectores, para articular matemática y física, con uso de TIC y actividad experimental. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31(Extra), 697–705.
Torroba, P. y Trípoli, M. (2021). Magnitudes vectoriales: una propuesta de articulación en tiempos de pandemia. *Revista de enseñanza de la física*, 33(Extra), 621-627.
Trípoli M. y Torroba, P. (2023). Física en Clases de Matemática en Pandemia: Suma de Vectores. En *XXIII Encuentro Nacional y XV Internacional de Educación Matemática en Carreras de Ingeniería*; compilación de Carrere, Lucía Carolina [et al.]. - 1a ed - Paraná: Universidad Nacional de Entre Ríos. UNER 2023. Libro digital, PDF. Páginas 234-241.
Trípoli, M., Torroba, P. y Taday, T. (2023). Vectores: dificultades observadas en estudiantes de Física I. Libro de *Actas de las 7mas Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza* / Fernando Inthamoussou ... [et al.]; compilación de Lucrecia Poteca; editado por Liliana Gassa ; Gabriela Caorsi. - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2023. Libro digital, PDF. Páginas 99-104.
Verd Pericás y Lozares Colina. (2016). Capítulo 6: El método de la entrevista. *Introducción a la investigación cualitativa: Fases métodos y técnicas*. Editorial Síntesis.

ARTICULACIÓN ENTRE MATEMÁTICA Y FÍSICA: LA EXPERIENCIA DE LOS ESTUDIANTES A TRAVÉS DE ENTREVISTAS

Trípoli, María de las Mercedes y Torroba, Patricia

Unidad de Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias- UIDET IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
mercedes.tripoli@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación y Desarrollo Acreditado de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP): “Articulación en la enseñanza de las Ciencias Básicas en carreras de Ingeniería”.
Equipos de trabajo conformados por docentes de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNLP e integrantes del mencionado proyecto, han estado diseñando y desarrollando actividades de articulación entre materias del área de ciencias básicas, como matemática y física, así como con otras asignaturas tecnológicas básicas. Estas actividades se fundamentan en la dificultad que enfrentan los estudiantes para relacionar los temas enseñados en una asignatura con conceptos similares estudiados en otras.
Cada área del conocimiento utiliza un lenguaje, terminología y nomenclatura propios, lo que representa un desafío significativo para los estudiantes universitarios en sus primeros años. En su mayoría, aún no cuentan con la capacidad de establecer estas conexiones por sí mismos. Además, es importante tener en cuenta que, en el caso de los estudiantes de ingeniería, la matemática debe concebirse como una herramienta para resolver problemas prácticos, más que como un fin en sí misma. Según Santaló (1994), los futuros ingenieros requieren una comprensión intuitiva de los conceptos matemáticos que les permita identificar cuándo y cómo aplicarlos de manera efectiva.
Por lo tanto, la articulación entre asignaturas debe orientarse a facilitar esa comprensión y aplicación de la matemática, utilizando un lenguaje común y una metodología coherente que garantice la continuidad lógica del aprendizaje. De esta manera, los estudiantes podrán utilizar los conocimientos adquiridos en una asignatura dentro del contexto de otra, evitando la fragmentación del conocimiento y favoreciendo la integración, transferencia y la relación de los aprendizajes (Barranquero y Rocca, 2014). Así, entendemos la articulación como los esfuerzos necesarios entre distintas asignaturas para lograr un diálogo que facilite el tránsito de los alumnos, mediante el uso de un lenguaje común que permita reconocer los objetos comunes en las distintas asignaturas, presentados en formatos diferentes y una metodología coherente que unifique las “reglas de juego”. Este tipo de articulación debe garantizar una continuidad lógica y natural en el proceso de enseñanza y aprendizaje.
La articulación entre disciplinas es esencial para lograr este objetivo, especialmente en carreras como ingeniería, que son inherentemente interdisciplinarias. La implementación de actividades que conecten distintas áreas del conocimiento puede ayudar a los estudiantes a comprender que los fenómenos no existen de manera aislada, promoviendo una visión integrada y científica del mundo (Gascón, 2009; Páez, 2011). De este modo, se avanza en la formación de estudiantes capaces de integrar las matemáticas y la física de manera efectiva, contribuyendo a la resolución de problemas prácticos en su futuro profesional.
Dentro de las actividades llevadas a cabo por los integrantes del proyecto, se han desarrollado propuestas que relacionan el tema de “magnitudes vectoriales” estudiado en Matemática A con conceptos vinculados a Física I. Ambas asignaturas forman parte del primer año de los planes de estudio de todas las carreras de la Facultad, siendo Matemática A del primer semestre y Física I del segundo. Las propuestas variaron según las experiencias adquiridas en su desarrollo y el contexto en el que se realizaron, incluyendo la cantidad de alumnos en el aula,

la especialidad de ingeniería cursada, y las circunstancias de la prepandemia, pandemia y postpandemia (Torroba, Trípoli, Devece y Aquilano, 2017; Torroba, Trípoli, Devece y Aquilano, 2019; Torroba y Trípoli, 2021, Trípoli y Torroba, 2023; Trípoli, Torroba y Taday, 2023), entre otras variables emergentes. En este trabajo, no se enfoca la atención en las actividades realizadas, sino que se analizan las percepciones de los estudiantes a través de entrevistas individuales semiestructuradas, sobre una de las actividades desarrolladas durante la postpandemia, que de ahora en adelante la denominaremos la *Actividad*. Al conocer las opiniones de los estudiantes, se busca reflexionar sobre la implementación de este tipo de actividades de articulación y evaluar su utilidad, dado que la articulación entre estas disciplinas no solo permite a los estudiantes conectar diferentes áreas de conocimiento, sino que también fomenta un aprendizaje más significativo al aplicar conceptos matemáticos a situaciones físicas concretas.

Contextualización de las entrevistas realizadas

Breve relato de la *Actividad*:

La *Actividad* se realizó en una comisión de Matemática A de la FI de la UNLP, durante el primer cuatrimestre del año 2022. El objetivo fue profundizar en el estudio de las magnitudes vectoriales. La participación fue optativa. De un total de 54 estudiantes asistentes a las clases, se inscribieron 16 y fueron 12 los que completaron la *Actividad* en todas sus instancias. El trabajo se centró en la suma de vectores, su representación gráfica, las distintas notaciones y lenguajes, así como en situaciones físicas concretas y se estructuró para facilitar un enfoque práctico y colaborativo.
La *Actividad* consistió en dos encuentros presenciales y uno virtual en un período de tres semanas, cada uno con una duración de entre una hora y hora y media, fuera del horario de clases. Fue coordinada por la profesora de Matemática A y la de Física I, y colaboró otro profesor de Física I para la parte experimental y un becario que apoyó a los estudiantes durante el recorrido
En el primer encuentro, se presentó una experiencia práctica sobre la posibilidad de colocar una soga con una pesa en su parte media en forma horizontal, que se analizó mediante la suma de vectores. En el segundo encuentro, se introdujo la magnitud vectorial 'cantidad de movimiento' y se plantearon tres situaciones experimentales de choques de móviles, verificando los resultados obtenidos previamente de manera teórica (Figura 1). Los estudiantes trabajaron en grupo para resolver una cuarta situación, que se discutió en el pizarrón, y además se planteó una tarea adicional. El tercer encuentro, virtual, se dedicó a devolver todas las tareas.



Figura 1. Fotos de dos momentos de la *Actividad* optativa realizada en Matemática A

Se propusieron cuatro tareas grupales a lo largo de la *Actividad*: la primera consistió en realizar una suma de vectores para compararla con la resolución en Física I, la segunda implicaba resolver ejercicios desde la perspectiva física, la tercera abordaba choques de móviles utilizando la suma de vectores y la última presentaba una situación más compleja a resolver después del segundo encuentro.

Encuesta final de la *Actividad*

Al finalizar la *Actividad*, se pidió a los estudiantes que completaran una encuesta anónima para analizar su experiencia, ya que son los principales participantes. Se les instó a responder con sinceridad y a tomarse el tiempo necesario, dado que sus respuestas son fundamentales para el análisis de las experiencias implementadas. De los 12 estudiantes que participaron, 9 completaron la encuesta, la cual se dividió en tres partes: sobre los 3 encuentros, sobre las 4 tareas propuestas y sobre la actividad en general.
En la sección de preguntas referidas a los encuentros, se proporcionó un espacio para que los estudiantes compartieran sus impresiones sobre la explicación, el desarrollo experimental, las diferencias entre las notaciones de matemática y física, el tiempo dedicado y la tarea realizada en clase, así como cualquier otro comentario relevante.
En la parte de las preguntas relacionadas con las tareas, se pidió a los estudiantes que indicaran la dificultad de los ejercicios y su método de resolución. Si un ejercicio se resolvió en el encuentro, se preguntó si consideraban útil esa modalidad. También se indagó si las tareas les ayudaron a relacionar el tratamiento de los vectores en física y matemática.
En cuanto a la *Actividad* en general, se preguntó si consideraban interesante el tema elegido, la importancia de realizar actividades de este tipo en Matemática A para vincular la matemática con situaciones concretas de otras áreas, como la física, y qué les aportó la *Actividad*. En todas las preguntas, se dejó un espacio para que los estudiantes expresaran sus opiniones.
Las respuestas fueron mayoritariamente positivas, con los alumnos ofreciendo justificaciones detalladas que reflejaban tanto las dificultades como los aspectos motivadores de la *Actividad*.

La entrevista: la voz de los estudiantes

Como se mencionó anteriormente, a través de la comprensión de las experiencias y opiniones de los estudiantes, se busca identificar cuáles aspectos de la *Actividad* resultaron más efectivos, garantizando así que estas iniciativas contribuyan significativamente al aprendizaje y a la integración de conocimientos en sus respectivas disciplinas.
La realización de la encuesta al finalizar la *Actividad* proporcionó información valiosa sobre las dificultades y los aspectos motivadores. Sin embargo, dado que la *Actividad* se centró en la articulación de conceptos matemáticos y físicos, y los estudiantes aún no habían cursado Física I (materia correlativa a Matemática A), se consideró pertinente conversar con ellos una vez completado dicho curso (asistir regularmente a clase, participar activamente en las tareas propuestas por los docentes y rendir los exámenes correspondientes). Esta decisión llevó al uso de la entrevista como estrategia, ya que, según Piovani (2007), se configura como un encuentro destinado a recolectar información específica en el contexto de una investigación. Este método es especialmente útil para obtener datos cualitativos, ya que permite explorar hechos no directamente observables, como las opiniones de los estudiantes (Verd Pericás y Lozares Colina, 2016).
Se optó por realizar las entrevistas de forma personal (cara a cara) y con un enfoque semiestructurado o focalizado. En este tipo de entrevista, los entrevistados (los estudiantes) han participado en una situación social (la *Actividad* de articulación) cuya experiencia subjetiva se convierte en el foco de la entrevista (Piovani, 2007). Las entrevistas semiestructuradas se basan en un diseño de investigación previamente planificado que incluye un guión flexible con preguntas abiertas, permitiendo al entrevistador profundizar en ciertos aspectos según la evolución de la conversación. Durante la entrevista, el entrevistador debe estar atento a las respuestas del entrevistado, lo que permite que estas guíen el flujo de la conversación y genere nuevas preguntas y profundizaciones espontáneas. Esta técnica, por tanto, facilita la obtención

de una rica variedad de información y la clarificación de respuestas en un marco de interacción más directo y flexible (Verd y Lozares, 2016).

Metodología

Las entrevistas se llevaron a cabo a mediados del mes de abril del año 2023, cuando los estudiantes estaban cursando Física II y Matemática C, entre otras asignaturas. Se contactó a los alumnos mediante un correo electrónico en el que se explicaba el motivo del mensaje. De los 9 que completaron la encuesta, 5 participaron de las entrevistas. Todos los entrevistados habían promocionado tanto Matemática A como Física I. Las entrevistas se realizaron el mismo día, y se estimó un tiempo de duración de 15 minutos para cada una de ellas, organizando las citas en consecuencia.

Dado que se eligió la entrevista semiestructurada, se diseñó una serie de preguntas. Las primeras consistieron en cuestiones generales, para luego focalizarse en interrogantes más específicos relacionados con el objeto de estudio de esta investigación, lo cual constituye una de las características distintivas de este tipo de entrevistas (Tabla 1).

Tabla 1. Preguntas iniciales pautadas para las entrevistas

Durante la cursada de Física I, ¿recordaste en algún momento la Actividad optativa realizada en Matemática A sobre magnitudes vectoriales?
¿Considerás que te fue útil haber visto en la *Actividad* Optativa las distintas notaciones vectoriales que se utilizan en Física I?
Considerando que ya aprobaste Física I, ¿te parece que valió la perna haber participado de la *Actividad* optativa?

El proceso de análisis de las entrevistas consistió en varias escuchas de las grabaciones considerando, no sólo el contenido verbal sino el tono, pausas y otras expresiones no verbales que se consideraron relevantes, con toma de notas sobre impresiones generales, temas que surgieron y patrones iniciales observados.

De acuerdo con las preguntas formuladas durante la entrevista, tanto las iniciales como aquellas que fueron surgiendo a lo largo de las mismas, las respuestas fueron codificadas en cinco categorías, según se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Categoría de análisis de las entrevistas

Relación entre Matemática A y Física I a través de la *Actividad* optativa
Percepción de la utilidad de la notación vectorial
Valoración de la Actividad optativa
Relación entre Matemática A y Física I a través de otros temas comunes
Vinculación entre Matemática B y Física II

Resultados y análisis

Las categorías propuestas permitieron organizar las entrevistas de manera que se pudieran identificar patrones comunes y divergentes entre los estudiantes, facilitando así un análisis más estructurado y detallado.

Relación entre Matemática A y Física I a través de la *Actividad* optativa: todos los estudiantes manifestaron haber recordado la *Actividad*, la cual la asociaron con la aparición en Física I de conceptos tales como choques elásticos y plásticos, y cantidad de movimiento y su conservación. De acuerdo con sus comentarios, por haber utilizado el mismo material didáctico en ambas oportunidades. Mientras algunos recordaron los detalles de la actividad otros no lo hicieron de inmediato. Se puede concluir que esto resalta la efectividad de la *Actividad* como un puente entre ambas disciplinas, contribuyendo a la comprensión de conceptos físicos. La coincidencia en el material didáctico utilizado refuerza la idea de que la aplicación de recursos comunes puede facilitar la transferencia de conocimientos entre las distintas áreas.

Percepción de la utilidad de la notación vectorial: en cuanto la notación utilizada en ambas materias, los estudiantes consideraron que les fue beneficioso haber trabajado con ella en la *Actividad.* Sin embargo, la facilidad con la que algunos estudiantes lograron transferir la notación de Matemática A a Física I no fue homogénea. Algunos encontraron natural el traspaso de notación, mientras que a otros no les resultó tan fácil. Un estudiante propuso la idea de incorporar de manera más general (no solamente en actividades especiales) la notación de versores en la cursada de Matemática A, lo que refleja la importancia de un enfoque más coherente y alineado con la notación que se utiliza en Física, la cual resulta más práctica para la resolución de problemas.

Valoración de la *Actividad* optativa: en general los estudiantes coincidieron en que la participación en la *Actividad* valió la pena, aunque la percepción de su utilidad varió. Algunos la valoraron por darle sentido a lo que estudiaban en Matemática A, mientras que otros consideraron que su mayor utilidad se mostró en el contexto de Física I. Para algunos, la *Actividad* ayudó a superar temores frente a nuevos temas, al brindarles una perspectiva más completa, mientras que otros, inicialmente escépticos, reconocieron que la actividad les ofreció un enfoque adicional y práctico que favoreció su aprendizaje. Este punto subraya la importancia de crear experiencias educativas que no solo enseñen contenidos, sino que también ayuden a los estudiantes a ganar confianza en sus capacidades.

Relación entre Matemática A y Física I a través de otros temas comunes: algunos estudiantes manifestaron que los contenidos de Matemática A, como la derivada, fueron útiles para entender mejor algunos conceptos de Física I, como la velocidad y aceleración. Esto indica que la formación matemática previa puede facilitar la comprensión de conceptos físicos, aunque no todos los estudiantes hayan sido conscientes de esta conexión. Cuando se les preguntó sobre la relación entre el Movimiento Armónico Simple (MAS) en Física I y los temas estudiados en Matemática A, los estudiantes en su mayoría no lograron hacer la conexión entre las funciones circulares de Matemática A y el MAS. Este resultado sugiere que, aunque los contenidos de Matemática A son relevantes para ciertos aspectos de Física I, algunos conceptos pueden no haber sido suficientemente destacados en el contexto de Matemática A o pueden requerir un enfoque más explícito para facilitar la conexión entre las disciplinas.

Vinculación entre Matemática B y Física II: los estudiantes mencionaron que sus docentes de Física II establecieron vínculos entre los temas y notaciones que utilizaban en Matemática B, lo que puede haber facilitado la comprensión de los contenidos. Esto sugiere que la vinculación explícita que realicen los docentes es clave para que los estudiantes puedan establecer relaciones más claras y directas con los temas, lo que refuerza la importancia de la interdisciplinariedad en la enseñanza.

En resumen, el análisis de las entrevistas se centró en identificar patrones y discrepancias en las respuestas de los estudiantes según las categorías propuestas. A partir de la codificación y agrupación de las respuestas se interpretó que, aunque la actividad fue generalmente valorada en forma positiva, algunos estudiantes tenían dudas iniciales sobre su utilidad. El uso de las mismas herramientas didácticas facilitó el reconocimiento de la *Actividad* realizada previamente en la asignatura Matemática A. La variabilidad en el traspaso de notación entre Matemática A y Física I, así como la dificultad para conectar ciertos temas, sugiere que los estudiantes podrían necesitar un enfoque más guiado y explícito en la integración de los contenidos de ambas disciplinas. También se observó que el aprendizaje interdisciplinario fue una herramienta efectiva para la comprensión de temas complejos, lo que refuerza la importancia de facilitar este tipo de conexiones entre materias.

A manera de conclusión

Este trabajo se enfoca en el análisis de entrevistas semiestructuradas realizadas a estudiantes universitarios que participaron en una experiencia educativa centrada en la articulación entre

matemática y física. Esta estrategia de recolección de datos fue empleada por primera vez por las autoras, y se utilizó para evaluar el impacto de la actividad en la trayectoria educativa de los estudiantes a medida que avanzaban en sus estudios universitarios.
El análisis de las entrevistas proporcionó una visión detallada de las experiencias y ofreció recomendaciones para mejorar las prácticas educativas. A través de estas entrevistas, se identificaron áreas para revisar, lo que permite diseñar actividades más adaptadas a las necesidades de los estudiantes. Aunque los resultados son específicos de una población particular, las opiniones recabadas pueden extrapolarse a otros grupos en contextos similares.
La metodología de entrevista también permitió a las docentes reflexionar sobre su rol y mejorar sus enfoques pedagógicos. Además, el proceso ofreció una oportunidad para que los estudiantes se expresaran libremente, contribuyendo a un ambiente de aprendizaje más inclusivo.
Los resultados resaltan la importancia del trabajo interdisciplinario y la introducción temprana de notaciones y problemas matemáticos en materias previas, para facilitar una integración de contenidos de Matemática y Física y promover un currículo más pertinente y adaptado a las necesidades de los estudiantes.

Bibliografía

Barranquero, M. y Rocca, M. (2014). Fragmentación vs. integración en la construcción de conocimientos.En Estrategias de articulación e integración de conocimientos en la FAU. Experiencias al 2013. La Plata: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, UNLP.
Gascón, J. (2009). El problema de la Educación Matemática entre la Secundaria y la Universidad. Edu-cação Matemática Pesquisa, 11(2), 273-302.
Páez, O. (2011). Las competencias para el ingreso y para la permanencia en el primer año de las carreras de ingeniería, una mirada integradora desde una actividad profesional. I Jornada de Enseñanza de la Ingeniería. Facultad Regional Buenos Aires, Sede Campus. Libro de Resúmenes.
Piovani, J. I. (2007). Capítulo 12: La entrevista en profundidad, en Metodo*logía de las Ciencias Sociales,* de Marradi, A., Archenti, N. y Piovani, J. I. Buenos Aires: Emecé Editores.
Santaló, L. (1994). Matemática para no matemáticos. En: Parra, C. y Saiz, I. Didáctica de Matemáticas. Aportes y reflexiones. Buenos Aires: Paidós.
Torroba P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2017). Magnitudes vectoriales: una propuesta didáctica para articular matemática y física. *Revista de la enseñanza de la Física*, 29 (Extra), 305-313.
Torroba, P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2019). Implementación de una propuesta sobre vectores, para articular matemática y física, con uso de TIC y actividad experimental. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31(Extra), 697–705.
Torroba, P. y Trípoli, M. (2021). Magnitudes vectoriales: una propuesta de articulación en tiempos de pandemia. *Revista de enseñanza de la física*, 33(Extra), 621-627.
Trípoli M. y Torroba, P. (2023). Física en Clases de Matemática en Pandemia: Suma de Vectores. En *XXIII Encuentro Nacional y XV Internacional de Educación Matemática en Carreras de Ingeniería*; compilación de Carrere, Lucía Carolina [et al.]. - 1a ed - Paraná: Universidad Nacional de Entre Ríos. UNER 2023. Libro digital, PDF. Páginas 234-241.
Trípoli, M., Torroba, P. y Taday, T. (2023). Vectores: dificultades observadas en estudiantes de Física I. Libro de *Actas de las 7mas Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza* / Fernando Inthamoussou ... [et al.]; compilación de Lucrecia Poteca; editado por Liliana Gassa ; Gabriela Caorsi. - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2023. Libro digital, PDF. Páginas 99-104.
Verd Pericás y Lozares Colina. (2016). Capítulo 6: El método de la entrevista. *Introducción a la investigación cualitativa: Fases métodos y técnicas*. Editorial Síntesis.

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA LA ACTUALIZACIÓM DE REDES ALTIMÉTRICAS TOPOGRÁFICAS EN TIEMPO REAL

Justo, Claudio[a,b]; Calandra, María Valeria [a], Rodriguez, Franco [a,b]
a UIDET GAMEFI, Dto. Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
b Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900
maría.calandra@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Redes altimétricas, mínimos cuadrados secuenciales, estadístico de Chow.

Las redes altimétricas topográficas constituyen una herramienta fundamental para el desarrollo de la infraestructura. El modelo altimétrico topográfico, es válido para determinar las diferencias de alturas entre puntos y poder resolver la dirección del escurrimiento de fluidos en el entorno de obras. Por esto su mantenimiento y actualización se tornan prioritarios. El método de cálculo de estas redes, por excelencia, es el de Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP). De su aplicación obtendremos las cotas y desniveles más una estimación de sus incertidumbres. A medida que se incorporan nuevas observaciones es posible el recálculo y actualización de la red. Sin embargo, eso implica conservar todas las observaciones originales pudiendo no estar dicha información accesible. Para sobrellevar esto se aplicó Mínimos Cuadrados Ponderados Secuenciales (MCPS) en una red altimétrica de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. Se requirió contar, con los resultados del último procesamiento prescindiendo de las observaciones, más las nuevas observaciones a incorporar. Como resultado se obtuvo una actualización de las cotas de la red y sus incertidumbres. Se muestra, también la aplicación de una herramienta estadística para evaluar la consistencia respecto de la red ajustada previamente. En este sentido se evaluó el estadístico Chow de cambio estructural y el procedimiento clásico con el estadístico Chi-Cuadrado. Se vio que el estadístico de Chow no fue sensible a los cambios esperados. El algoritmo de MCPS demostró su relativa facilidad de aplicación y su eficiencia computacional. Presentó una aproximación numérica que alcanzó al orden de la mitad de la incertidumbre estándar del parámetro estimado por MCP. Es el caso de la ménsula C donde la diferencia entre las estimaciones de la cota de MCPS alcanza +0,0004m por sobre la estimación de MCP, siendo su desviación estándar de 0,0017m. Se verificó que el estadístico de Chow no fue sensible para la detección de cambio en el estado como lo fue el estadístico de Chi-Cuadrado. Consideramos que la aplicación de MCPS debe ser justificada en un contexto que permita ese orden de discrepancias. Se continúa trabajando en la búsqueda de otro estadístico que sea más sensible a los cambios esperados. Los cálculos se realizaron en el software libre R 4.3.3 destacando su utilidad para los cálculos estadísticos y computacionales.

INTRODUCCIÓN

El ajuste de redes altimétricas topográficas es realizado en forma extendida mediante el método de Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP) [1] para salvar la inconsistencia debida a los factores aleatorios que están siempre presentes en las mediciones y permite obtener indicadores de la calidad del trabajo realizado. El modelo altimétrico topográfico obtenido, es válido para poder dejar establecidas las alturas de marcas físicas colocadas expresamente con ese propósito, conocidas como ménsulas. Para ello se requiere medir desniveles entre las ménsulas de la red mediante la sumatoria de n desniveles individuales medidos a lo largo del itinerario que se requiere para llegar de una a otra. Estos desniveles obtenidos son las observaciones que se someten a un ajuste. En este trabajo se presenta un reajuste por Mínimos Cuadrados Ponderados Secuenciales (MCPS), sobre un trabajo realizado en una red altimétrica del campus de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI-UNLP) donde existen ménsulas distribuidas en casi todos los edificios del mismo.

OBJETIVOS

Dado que el trabajo realizado va perdiendo vigencia con el transcurso del tiempo, se debe actualizar frecuentemente y eso implica tomar nuevas mediciones en la red y calcular nuevamente las cotas. En este caso una de las ménsulas debió ser reemplazada debido a su destrucción total (Ver Figura 2). Para evitar repetir el cálculo completo de esta red con cada observación agregada y así mantenerla actualizada, se realizó la técnica presentada en este trabajo que resulta de utilidad si el número de mediciones nuevas es relativamente pequeño con respecto al número de observaciones antiguas. El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de MCPS para la detección de alguna anomalía (si la hubiera) durante el proceso de actualización. Usualmente esto se realiza mediante un Test Chi-Cuadrado con la comparación entre la varianza del ajuste y la varianza kilométrica establecida por el fabricante del equipo de medición, también realizamos el test de Chow para ver si hay un cambio estructural. La Figura 1 muestra un esquema de las dos redes altimétricas Red1 y Red2. La Red1 que fue ajustada hace un tiempo posee 10 desniveles (Ver Tabla1 resaltado) y a la Red2 se le agregaron los desniveles 11 y 12. Ambas constan de 8 ménsulas con la siguiente nomenclatura: Agrimensura Vieja (AV), Agrimensura Nueva (AN), Partenón (P), Química1 (Q1), Química2 (Q2), Hidráulica (H), Decanato (D), Construcciones(C). Estas ménsulas serán el soporte físico de las cotas de superficies equipotenciales cuyo valor será el resultado del ajuste de las observaciones de desnivel realizadas. (AV) sirvió para establecer el datum de referencia.

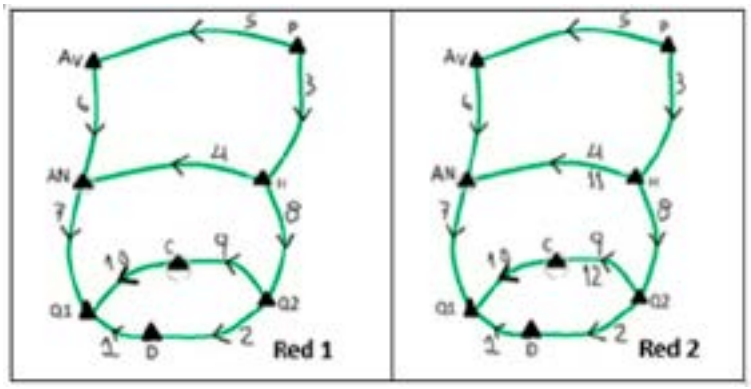


Figura1: Redes Altimétricas FI-UNLP.

Desniveles	Valor
D-Q1	-0,1101
Q2-D	-0,3737
P-H	1,613
H-AN	0,4136
P-AV	-16,189
AV-AN	18,2177
AN-Q1	0,86
H-Q2	1,7579
Q2-C	-0,8975
C-Q1	0,4112
H-AN	0,4136
C-Q2	0,8922

Tabla1: Desniveles (m).



Figura2: Ménsula Construcciones

MATERIALES Y MÉTODOS

El levantamiento de los desniveles, se realizó mediante el método de nivelación geométrica desde el medio [2] con niveles automáticos de 28 aumentos. El método de cálculo de redes altimétricas, por excelencia, es el de Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP). De su aplicación obtendremos las cotas $\hat{x}_{MCP}$ más una estimación de sus incertidumbres.

Para la obtención de un estimador de las cotas $\hat{x}_{MCP}$ por MCP consideramos que los desniveles de la red altimétrica denotados con y_i, pueden ser representados mediante un modelo lineal que relaciona lo desniveles de la red, con las variables predictoras a_i de la red de grafos que indica el itinerario entre las ménsulas que se mide el desnivel, tal que:

$$y_i = a_i x + \varepsilon_i \quad i = 1,2 \ldots . n \;\; con \; y_i \in R \;\; a_i \in R^P \qquad (1)$$

ε_i es el término del error, una variable aleatoria del modelo con una distribución Normal con media 0 y varianza σ_i^2 . En este caso $\sigma_i^2 = \frac{\sigma^2}{W_i}$ con una ponderación $w_i = \frac{1}{L_i}$ donde L_i es la longitud del recorrido necesario para obtener cada medición. El vector x representa el parámetro a estimar que corresponde al vector de las cotas. Dado que la varianza de ε_i no es constante, hace necesario aplica MCP en lugar de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). El ajuste por MCP se puede tratar como MCO, si escribimos (1) como:

$$\tilde{y}_i = \tilde{a}_i x + \tilde{\varepsilon}_i \quad i = 1,2 \ldots . n \qquad \text{con } \tilde{y}_i = \sqrt{w_i}\, y_i \tilde{a}_i = \sqrt{w_i}\, a_i\, \tilde{\varepsilon}_i = \sqrt{w_i}\, \varepsilon_i \tag{2}$$

Considerando $\tilde{A}$ la matriz de *n x p* con elementos $\tilde{a}_i = (\tilde{a}_{i1}, \tilde{a}_{i2} \ldots . . \tilde{a}_{ip})$, el vector $\tilde{\varepsilon}$ es un vector con elementos $\tilde{\varepsilon}_i$ y el vector $\tilde{y}$ con elementos:

$$\tilde{y}_i \; con \; i = 1,2 \ldots . n, \text{con: } \tilde{y} = \tilde{A}x + \tilde{\varepsilon} \tag{3}$$

Para encontrar el estimador del vector de parámetros $\hat{x}_{MCP}$ por MCP se busca el vector x que minimiza la función $\left[(\tilde{y} - \tilde{A}x)^t (\tilde{y} - \tilde{A}x)\right]$ Ello lleva a la resolución del sistema de Ecuaciones Normales de MCP y se obtiene la expresión matricial:

$$\hat{x}_{MCP} = inv(\tilde{A}^t \tilde{A}).\tilde{A}^t y \tag{4}$$

Y se calcula la matriz varianza covarianza de este estimador llamada $\Sigma(\hat{x}_{MCP})$ por la siguiente expresión:

$$\Sigma(\hat{x}_{MCP}) = \sigma^2 inv(\tilde{A}^t \tilde{A}) \tag{5}$$

Pero como σ^2 es desconocido, se estima con la suma de los cuadrados de los residuos (SSR) dividido $n - p$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SSR}{n-p} = \frac{[(\tilde{y} - \tilde{A}\hat{x}_{MCP})^t (\tilde{y} - \tilde{A}\hat{x}_{MCP})]}{n-p} \tag{6}$$

Con lo que resulta que:

$$\hat{\Sigma}(\hat{x}_{MCP}) = \hat{\sigma}^2 \, inv(\tilde{A}^t \tilde{A}) \tag{7}$$

La diagonal de esta matriz corresponde a la incertidumbre estimada de las cotas ajustadas por MCP

Algoritmo de Ajuste Secuencial: A medida que se incorporan nuevas mediciones a una red posible el recálculo y actualización de la misma. Sin embargo, eso implica conservar todas las observaciones originales pudiendo no estar dicha información accesible. Para sobrellevar eso se aplicó Mínimos Cuadrados Ponderados Secuenciales. Para ello se requiere contar, con los resultados del último procesamiento prescindiendo de las observaciones, más una nueva observación a incorporar. Como resultado se obtiene una actualización de las cotas de la red y sus incertidumbres El procedimiento consiste en los siguientes pasos (Ver Tabla2):

1-Sea $\tilde{A}_n \in R^{nxp}$ la matriz que contiene las n filas de la matriz $\tilde{A}$,$\tilde{y}_n$ las n componentes de $\tilde{y}$ de (3) y $\tilde{\varepsilon}_n$ las n componentes de $\tilde{\varepsilon}$ con $\tilde{y}_n = \tilde{A}_n x + \tilde{\varepsilon}_n$ se puede definir el estimador de x por MCP con las n mediciones como:

$$\hat{x}_n = inv(\tilde{A}^t{}_n \tilde{A}_n).\tilde{A}^t{}_n \, \tilde{y}_n \tag{8}$$

Y su matriz de covarianza estimada como:

$$\hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP}) = \hat{\sigma}^2 \, inv(\tilde{A}^t{}_n \tilde{A}_n) \tag{9}$$

2-Luego se calcula la nueva actualización del vector de parámetros $\hat{x}_{n+1}$ con el ingreso se una nueva medición de $\tilde{y}_{n+1}$ y de $\tilde{a}_{n+1}$:

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_n + k\,(\,\tilde{y}_{n+1} - \tilde{a}_{n+1}\hat{x}_n) \qquad \text{Con} k = \frac{\hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP})\tilde{a}_{n+1}}{\hat{\sigma}^2 + \tilde{a}_{n+1}\hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP})\tilde{a}_{n+1}{}^t} \tag{10}$$

Y la actualización de la matriz varianza covarianza estimada de $\hat{x}_n$ denotada por: $\hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP})$ resulta ser:

$$\hat{\Sigma}_{n+1}(\hat{x}_{MCP}) = \hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP}) - k\tilde{a}_{n+1}\,\hat{\Sigma}_n(\hat{x}_{MCP}) \quad (11)$$

3- Por último, se tienen las cotas actualizadas y su matriz de covarianzas: $\hat{x}_{n+1}$ y $\hat{\Sigma}_{n+1}(\hat{x}_{MCP})$

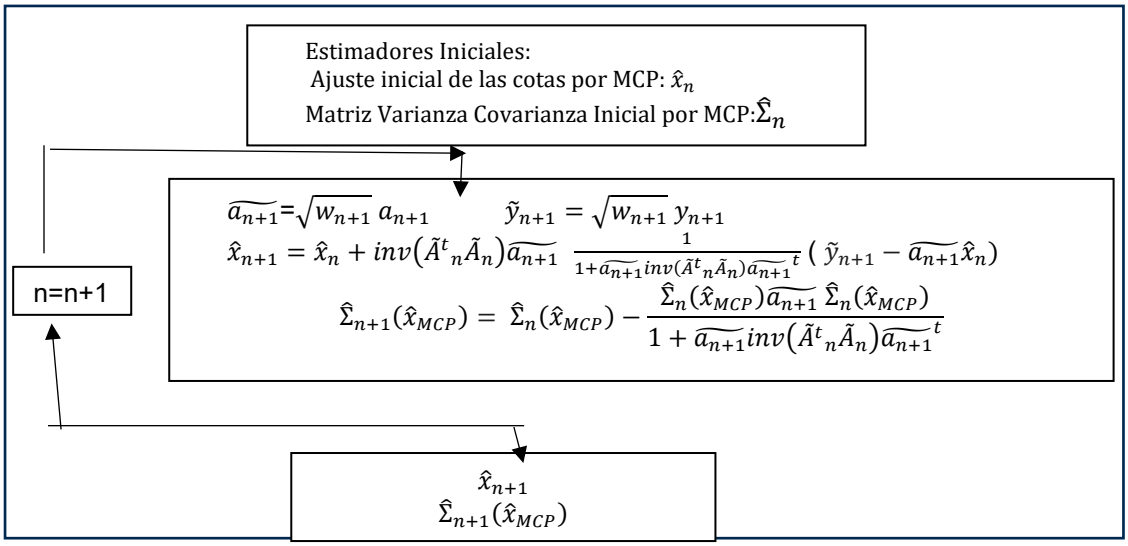


Tabla2. Diagrama del ajuste MCP secuencial

Este procedimiento que se observa en la Tabla2 se repitió dos veces dado que se incorporaron dos mediciones nuevas en este caso

¿Cómo se realiza el Test de Chow para verificar si la incorporación de las nuevas mediciones produjo un cambio estructural en el modelo?

Dadas la Red1 y la Red2 de la Figura 1 se calcula la suma de los cuadrados de los residuos de la Red1 que tiene 10 desniveles denotado con SSR_{RED1} también se calcula la suma de los cuadrados de los residuos de la Red 2 que tiene 12 desniveles denotado con SSR_{RED2}. Finalmente, se calcula el estadístico de Chow [4]:

$$\frac{\mathrm{SSR}_{red2}-\mathrm{SSR}_{red1}}{\mathrm{SSR}_{red1}}\left(\frac{10-p}{12-10}\right) \quad (12)$$

siendo p la cantidad de cotas o ménsulas que en este caso son 7. Este estadístico sigue una distribución Fisher $\mathcal{F}(2,3)$ bajo la hipótesis nula de que las cotas son iguales para ambas redes. Si el valor del estadístico de prueba del Test de Chow es significativo (es decir, si cae fuera de un intervalo crítico determinado por el nivel de significancia α), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que ha ocurrido un cambio estructural en el modelo. Este test pude ser incorporado en el script para el cálculo de MCPS [4].

RESULTADOS

En la Tabla 2 se presentan los resultados del ajuste de las cotas correspondientes a cada pilar. Se observa en Cotas1 Antiguo, el ajuste por MCP de la Red1 de la Figura 1 y en la 3ra columna la desviación estándar de las mismas. En la columna Cotas2 MCP, se muestra el ajuste tradicional con MCP de la Red2 de la Figura1 y en la 5ta columna su desviación estándar. En la columna Cotas3 MCPS se presentan los resultados de las cotas ajustadas por MCPS de la Red2 de la Figura1 y en la última columna sus desviaciones estándar.

Pilar	Cotas1 Antiguo	Desv 1	Cotas2 MCP	Desv 2	Cotas3 MCPS	Desv 3
AN	18,2172	0,0007	18,2172	0,0011	18,2172	0,0005
Q1	19,0770	0,001	19,0773	0,0015	19,0772	0,0007
D	19,1874	0,0012	19,1874	0,0017	19,1874	0,0008
Q2	19,5615	0,0011	19,5611	0,0015	19,5612	0,0007
H	17,8033	0,0009	17,8033	0,0012	17,8033	0,0006
P	16,1900	0,0009	16,1899	0,0013	16,1899	0,0006
C	18,6650	0,0012	18,6662	0,0017	18,6658	0,0008

Tabla 2. Cotas Ajustadas y desviaciones estándar(m).

Se realiza un Test Chi-Cuadrado para el ajuste de la Red1, confirmando que las desviaciones están en concordancia con las especificaciones del fabricante que informa una varianza kilométrica de 0,002mm, indicando consistencia entre las mediciones realizadas y las marcas físicas establecidas. Con el ajuste MCP de la Red2 de la Figura 1 se realizó un Test Chi-Cuadrado con $\alpha = 0{,}05$ que dio significativo ya que:

$$\chi^2_{red} = 5.\frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = 5\frac{0.00398^2}{0.002^2} \not< \chi^2_{\frac{\alpha}{2},5}=12.8325. \quad (13)$$

Esto implica una anomalía en la actualización de la red o un cambio significativo en la relación entre las variables predictoras, concordante con el cambio de la ménsula C. Lo mismo ocurre con el ajuste por MCPS de la Red2 la Figura 1, el Test dio significativo:

$$\chi^2_{red} = 5.\frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = 5\frac{0.00403^2}{0.002^2} \not< \chi^2_{\frac{\alpha}{2},5}=12.8325 \quad (14)$$

Se realiza el test de Chow para ver si hay cambio estructural entre cotas1 y cotas 2 que no resulta significativo con $\alpha = 0{,}05$ (Ecuación 15)

$$\frac{\mathrm{SSR}_{Cotas2}-\mathrm{SSR}_{Cotas1}}{\mathrm{SSR}_{Red1}}\frac{3}{2} = \frac{7.903923e{-}05-\ 2.123469e{-}05}{2.123469e{-}05}\frac{3}{2} = 4.08 \not> \mathcal{F}_{0,05}(2,3) = 9.55 \quad (15)$$

El test de Chow entre Cotas1 y Cotas3 tampoco da significativo con $\alpha = 0{,}05$ (Ecuación 16)

$$\frac{\mathrm{SSR}_{Cotas3}-\mathrm{SSR}_{Cotas1}}{\mathrm{SSR}_{Red1}}\frac{3}{2} = \frac{8.131273e{-}05-\ 2.123469e{-}05}{2.123469e{-}05}\frac{3}{2} = 4.24386 \not> \mathcal{F}_{0,05}(2,3) = 9.55 \quad (16)$$

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El algoritmo de MCPS demostró su relativa facilidad de aplicación y su eficiencia computacional. Presentó una aproximación numérica que alcanzó al orden de la mitad de la incertidumbre estándar del parámetro estimado por MCP. Es el caso de la ménsula C donde la diferencia entre las estimaciones de la cota de MCPS alcanza +0,0004m por sobre la estimación de MCP, siendo su desviación estándar de 0,0017m. Se verificó que el estadístico de Chow no fue sensible para la detección de cambio en el estado como lo fue el estadístico de Chi-Cuadrado. Consideramos que la aplicación de MCPS debe ser justificada en un contexto que permita ese orden de discrepancias. También se debe buscar otro estadístico que pueda ser sensible a los cambios esperados.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Justo C. (2018) Tratamiento Estadístico de una Red Altimétrica Topográfica. Tesis de Maestría en Ingeniería UNLP.
[2] Wolf, P. y Ghilani, C. (2006). Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, Fourth Edition.Wiley. USA, 611.
[3] Teunissen P.J.G. (2024). Dynamic Data Processing, Series on Mathematical Geodesy and Positioning, TU Delft OPEN Publishing, Paises Bajos, 241.
[4] Arrufat, J.L. (1990). Mínimos Cuadrados Recursivos, Económica; 36, 3-20.

TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE SISTEMAS LINEALES

Calandra Maria Valeria[1]; Devece Eugenio[2]; Centorbi, Guillermo[2]; Porcel de Peralta, Benjamin[2]; Di Paolantonio, Anyelen[1]

[1]UIDET GAMEFI, Dto. Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As.
[2]UIDET IMApEC – Dto. Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As.
eugenio.devece@ing.unlp.edu.ar;

Este trabajo presenta el desarrollo de una propuesta implementada en un curso de Estadística en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FIUNLP), cuyo objetivo es promover la interacción multidisciplinaria y favorecer el aprendizaje de los estudiantes mediante una comprensión integral y aplicable de las leyes que rigen los sistemas lineales y su comportamiento estadístico. Con el fin de evitar la monotonía, se modifican periódicamente las situaciones de enseñanza y se invita a docentes de otras asignaturas a realizar experiencias utilizando los conceptos impartidos. En esta facultad, los cursos de Estadística y Física 1, aunque abordan diferentes aspectos de los sistemas lineales, ofrecen enfoques complementarios que son fundamentales para la formación de futuros ingenieros. A lo largo de la carrera, resulta imprescindible integrar los conocimientos adquiridos en estas áreas, especialmente al tratar fenómenos físicos como la Ley de Hooke y su análisis estadístico. Para favorecer esta integración en la enseñanza, se invitó a docentes de Física 1 a llevar a la clase de Estadística dispositivos para medir la deformación de un resorte bajo distintas cargas, con el fin de obtener una muestra que permita trabajar la deformación del resorte desde una perspectiva estadística y contrastar dicha impresión con el tratamiento teórico abordado en Física 1. En los cursos de Física 1, los estudiantes de ingeniería estudian la Ley de Hooke, que establece la relación lineal entre la fuerza aplicada a un material elástico y la deformación que este sufre. Este marco teórico propone un modelo determinista, donde se conoce la deformación resultante a partir de una fuerza específica aplicada sobre un sistema en equilibrio. Por otro lado, en la materia de Probabilidades y Estadística, el enfoque se amplía más allá de la relación determinística entre fuerza y deformación, centrándose en la variabilidad y el comportamiento estadístico de los sistemas bajo diferentes fuerzas aplicadas a un conjunto de materiales similares. En este contexto, el objetivo es modelar cómo la deformación puede variar en función de la fuerza aplicada, considerando no solo un valor promedio, sino también distribuciones de probabilidad que reflejan la variabilidad inherente de los materiales y las condiciones de prueba. Los conceptos de regresión, correlación y distribución de probabilidad se convierten en herramientas clave para entender las relaciones entre variables como la deformación y la fuerza F, donde las condiciones experimentales pueden diferir. Esta integración plantea diversos interrogantes fundamentales: ¿cómo puede la combinación de los enfoques determinista de la Física y probabilístico de la Estadística mejorar la comprensión de los estudiantes sobre los sistemas lineales? ¿Qué ventajas ofrece el análisis estadístico de la deformación de materiales en comparación con el tratamiento puramente determinista de la Ley de Hooke? Además, surge la pregunta de cómo la colaboración interdisciplinaria y la incorporación de experiencias prácticas de docentes de otras asignaturas pueden ayudar a los estudiantes a aplicar estos conceptos en situaciones del mundo real. Un logro significativo fue la aplicación de herramientas estadísticas, como los test de hipótesis y el análisis de residuos, para evaluar y observar las deformaciones del material. A través de los test de hipótesis, los estudiantes pudieron verificar la validez de las relaciones entre la fuerza y el desplazamiento, comprobando si los datos experimentales se ajustaban a la Ley de Hooke. Por otro lado, el análisis de residuos les permitió identificar posibles desviaciones de los modelos ideales y detectar irregularidades o anomalías en el comportamiento del material, lo que mejoró la precisión de sus predicciones y su comprensión del fenómeno.

Palabras clave: Ley de Hooke, Estadística, Física, Deformación, Regresión, Articulación.**2.**

Introducción

La temática de la Ley de Hooke se aborda en el apunte de la cátedra de Probabilidades y Estadística como un ejemplo para el desarrollo curricular del tema de regresión lineal simple, y suele incluirse en los ejercicios de los parciales. Los docentes de la cátedra hemos observado que los alumnos tienden a repetir sistemáticamente ciertos errores en estos exámenes. Según Batanero y otros (1994), "los errores y dificultades que enfrentan los estudiantes en el aprendizaje de la estadística no son aleatorios; frecuentemente se pueden identificar regularidades y asociaciones con variables relacionadas con las tareas propuestas, los propios estudiantes o circunstancias pasadas". En este contexto, el presente trabajo busca articular los enfoques de la Física y la Estadística para facilitar la comprensión de los estudiantes, estableciendo un puente entre el tratamiento de estos temas en ambas materias. Coincidimos con Fanaro y otros (2021) en que la planificación e implementación de propuestas interdisciplinarias tiende a "superar la fragmentación del conocimiento y poner en diálogo los procesos de la enseñanza y del aprendizaje" para lo cual es necesario "un trabajo pedagógico colaborativo entre los docentes, a fin de (re)visar, (re)organizar, (re)construir forma de enseñar y aprender". Para ello, se llevó a cabo una actividad contextualizada en la cual los alumnos midieron las deformaciones de un resorte bajo distintas cargas y analizaron los datos desde un enfoque estadístico, recordando su tratamiento en el curso de Física 1. El objetivo fue cubrir los temas de Probabilidades y Estadística relacionados con la regresión lineal simple. Se organizó un encuentro en una clase regular de Estadística con aproximadamente 90 alumnos de diversas especialidades de la FIUNLP, con la colaboración de los docentes de ambas materias. En el año anterior, los docentes de Física 1 habían tratado la Ley de Hooke. Durante ese desarrollo, se utilizó un enfoque guiado para el ajuste lineal mediante mínimos cuadrados en Excel, sin abordar técnicas estadísticas avanzadas. Sin embargo, los estudiantes aprendieron a calcular un intervalo para la constante del resorte basado en la incertidumbre instrumental de las mediciones y la propagación de varianzas, sin realizar inferencia estadística. Desde hace algunos años en la materia Física 1 se realizan actividades de articulación con otros cursos de la FIUNLP (Cozzarin A. y otros, 2023; Torroba P. y otros, 2017 y 2019). Esta nueva colaboración interdisciplinaria permitiría integrar los enfoques deterministas de la Física y probabilísticos de la Estadística en el análisis de sistemas lineales. Además, utilizar herramientas estadísticas como el análisis de residuos para verificar la validez de los modelos lineales y realizar pruebas estadísticas de hipótesis e intervalos de confianza para la constante del resorte. Como así también evaluar el impacto pedagógico de esta integración

Metodología y Desarrollo

La Ley de Hooke establece que la fuerza aplicada sobre un material elástico es proporcional a su deformación, lo cual se expresa con la fórmula $F = k \cdot x$ donde F es la fuerza aplicada al material, k es la constante elástica y x es la deformación del material. En este contexto, se busca determinar la constante k de un resorte mediante el método estático (Resnick y otros,1993; Cozzarin A. y otros, 2023). Para llevar a cabo el desarrollo experimental en clase, se utilizó un dispositivo proporcionado por los docentes de Física 1. Este dispositivo consistía en un resorte incorporado en un dinamómetro, el cual se colgaba de un pie con una escala graduada (ver Fig. 1). Se fijó el cero de la escala y, a continuación, se añadieron una serie de pesas. Se registraron las fuerzas aplicadas y la posición del resorte después de cada carga, lo que permitió anotar la deformación correspondiente a cada valor de fuerza (ver Tabla 1). Antes de realizar un análisis estadístico de los datos recogidos, se llevó a cabo una breve encuesta a los estudiantes para evaluar qué recordaban sobre el tratamiento de la Ley de Hooke en Física 1. Los resultados de esta encuesta revelaron que los estudiantes recordaban cómo



Fig.1: dispositivo de medición

Y: Desplazamiento (m)	X: Fuerza N
0,004	0,1
0,008	0,3
0,014	0,6
0,020	0,8
0,034	1,3

Tabla.1: datos experimentales

estimar la recta que ajustaba los datos experimentales utilizando Excel. Además, más del 70% de los alumnos mencionó que solían calcular un intervalo para la constante del resorte, basándose en la incertidumbre de las mediciones instrumentales y empleando la fórmula de propagación de la incertidumbre.

En el tratamiento estadístico de los datos experimentales, los estudiantes debieron ajustar los mismos utilizando un modelo lineal, donde la relación entre la deformación Y versus la fuerza X se describe como: $Y = \beta_1 X + \beta_0 + \epsilon$. En esta ecuación, Y representa la deformación del resorte (desplazamiento) al aplicar una fuerza X siendo ε un error aleatorio que se distribuye con media cero y varianza constante, lo que genera la variación aleatoria de los Y alrededor de su valor medio. Para ajustar los datos experimentales, se utilizó el método de mínimos cuadrados, que permite estimar los parámetros β_1 y β_0. En un escenario ideal, el estimador de la pendiente $\widehat{\beta_1}$ debería ser equivalente a la inversa de la constante elástica $\frac{1}{k}$. Además, el estimador del intercepto $\widehat{\beta_0}$ debería ser estadísticamente cercano a cero si los datos se comportan según la Ley de Hooke. Es importante aclarar que, cuando en estadística se menciona un modelo lineal, se refiere a la linealidad en los parámetros y no necesariamente en las variables. Esto representa un cambio de paradigma respecto al tratamiento habitual en matemáticas y física. En el contexto de Física 1, los estudiantes suelen ajustar la fuerza en función de la deformación. Sin embargo, en el análisis estadístico, se considera la fuerza F como la variable independiente (no aleatoria), representándola en el eje de las abscisas. Por su parte, la deformación, que depende de la fuerza aplicada, se trata como la variable dependiente (con error aleatorio) y se representa en el eje de las ordenadas. De este modo, la constante del resorte k se obtiene como la inversa de la pendiente de la recta de ajuste. Este cambio de perspectiva generó cierta confusión al principio, pero también permitió a los estudiantes comprender cómo la estadística puede complementar y enriquecer el análisis físico de los fenómenos (Figura 2).



Figura 2. Protocolo 1 (modelo de regresión

Para evaluar la calidad del ajuste lineal entre los datos experimentales y la fuerza aplicada, los estudiantes calcularon el coeficiente de determinación R^2 y llevaron a cabo el ajuste de la recta mediante el método de los mínimos cuadrados. Algunos lo realizaron de manera manual, mientras que otros utilizaron software como GeoGebra, Excel o programación en lenguaje R, como se ilustra en la Figura 3. Varios estudiantes intentaron ajustar los datos aplicando un modelo que forzaba la ausencia de intercepto, con la intención de cumplir estrictamente con la Ley de Hooke. Este enfoque generó un debate sobre la validez de su metodología, dado que la exclusión del intercepto puede no ser apropiada en todos los contextos experimentales.

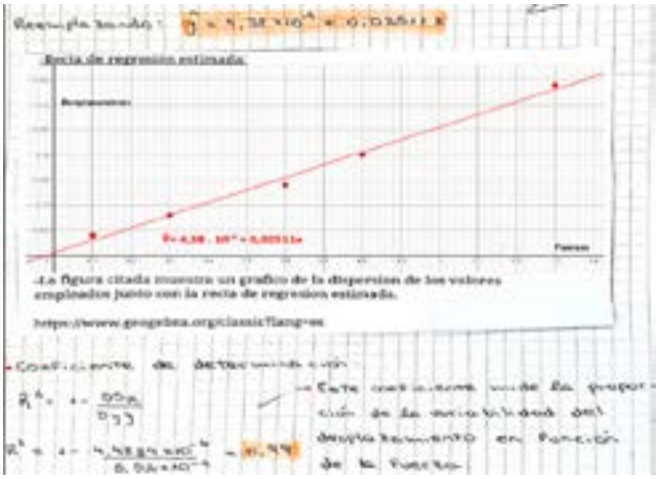


Figura 3 protocolo 2 (ajuste de mínimos cuadrados y coeficiente de determinación)

Los estudiantes también debieron calcular el intervalo de la constante del resorte, considerando distintos enfoques de Física y Estadística. Los métodos utilizados incluyeron el método empírico, el método analítico y el método estadístico (Tabla 2).

Intervalo gráfico para la constante del resorte Física Método Empírico	Obtener el valor de ki para cada par $(\boldsymbol{xi}, Fi)$ Es decir: $Ki = \frac{Fi}{xi}\ \forall i$ Incerteza dinamómetro 0,05 N,incerteza regla 0,001m.	Calcular $\boldsymbol{kpromedio} = \frac{\boldsymbol{kmáximo+kmínimo}}{\mathbf{2}}$ Dibujar dos líneas de ajuste: una por los puntos más altos y otra por los puntos más bajos dentro de las barras de error. Calcular la pendiente de ambas: KMax y KMin calcular: $\Delta k = \frac{KMax+Kmin}{2}$	Intervalo $\boldsymbol{kpromedio} \pm \Delta k$
Intervalo para la constante del resorte en Física Método Analítico	Obtener el valor de k para cada par (xi, Fi) Es decir: $Ki = \frac{Fi}{xi}\ \forall i$ Incerteza dinamómetro 0,05 N. Incerteza regla 0,001m.	$\overline{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ki}{n}$ propagar incertidumbre ΔKi con la incertidumbre ΔFi y con la incertidumbre Δxi $\Delta Ki = \sqrt{\left(\frac{1}{xi}.\Delta Fi\right)^2 + \left(-\frac{Fi}{xi^2}.\Delta xi\right)^2}$ Calcular $\Delta\overline{K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta Ki)^2}{n}}$	Intervalo $\overline{K} \pm \Delta\overline{K}$
Intervalo para la constante del resorte en Estadística	Ajustar(Fi, xi) modelo lineal: $\boldsymbol{Xi} \simeq \boldsymbol{\beta_1 Fi} + \boldsymbol{\beta_0}$ Con $\beta_1 = \frac{1}{k}$	Usamos mínimos cuadrados para obtener $\widehat{\beta_1}\ \widehat{\beta_0}$ $\widehat{\beta_1} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} Fixi - \sum_{i=1}^{n} Fi \sum_{i=1}^{n} xi}{n\sum_{i=1}^{n} Fi^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Fi\right)^2}$ $\widehat{\beta_0} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi - \widehat{\beta_1}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Fi$ Sea $SE(\widehat{\beta_1})$ la incertidumbre estimada de $\widehat{\beta_1}$ $SE(\widehat{\beta_1}) = \sqrt{\frac{1}{n-2}.\frac{\sum_{i=1}^{n}(xi - \widehat{\beta_0} - \widehat{\beta_1}Fi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Fi - \bar{F})^2}}$	Intervalo $\left[\frac{1}{\widehat{\beta_1} + t_{\frac{\alpha}{2}} SE(\widehat{\beta_1})}; \frac{1}{\widehat{\beta_1} + t_{\frac{\alpha}{2}} SE(\widehat{\beta_1})}\right]$ Con $t_{\frac{\alpha}{2}}$ el cuantil $1-\frac{\alpha}{2}$ de la distribución T de Student con n-2 grados de libertad

Tabla.2: métodos para la obtención de los intervalos para la constante del resorte

Cada uno de estos enfoques proporcionó a los estudiantes diferentes representaciones de la constante del resorte y su intervalo de incertidumbre. Se observó que el método estadístico fue el más preciso, ya que considera tanto el ajuste de los datos como la variabilidad e incertidumbre inherentes a las mediciones experimentales (Figura 4). Sin embargo, muchos estudiantes buscaron una solución rápida mediante la aplicación del método estadístico, asumiendo que era suficiente con calcular un intervalo de confianza para la pendiente de la recta β_1 . Pasaron por alto que, en este caso, β_1 representa $\frac{1}{k}$, lo que implica que el intervalo debe ser invertido para obtener el correspondiente a la constante del resorte k.

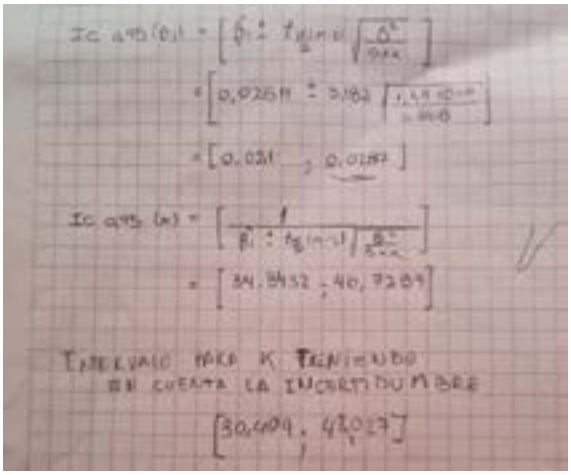


Figura 4: protocolo 3 (intervalos para la constante K del resorte)

Se evaluaron y graficaron los residuos del modelo en función de los valores predichos del desplazamiento del resorte (Figura 5). Los estudiantes no identificaron desviaciones significativas respecto al comportamiento ideal; sin embargo, un grupo observó un residuo estudentizado mayor a 2, lo cual podría considerarse un dato atípico (Montgomery, D.C y otros, 2006). Este hallazgo suscitó un debate sobre la relevancia del análisis de residuos y su interpretación. Se concluyó que, dado que este residuo correspondía a la última observación registrada, podría estar asociado a una posible deformación del resorte, justificando su clasificación como un valor atípico en lugar de un error en el modelo propuesto. Además, la discusión permitió establecer que el análisis de los residuos estudentizado puede facilitar la identificación de observaciones con errores más significativos, ya que proporciona una indicación de "cuán grande" es ese error en relación con el resto de las observaciones.

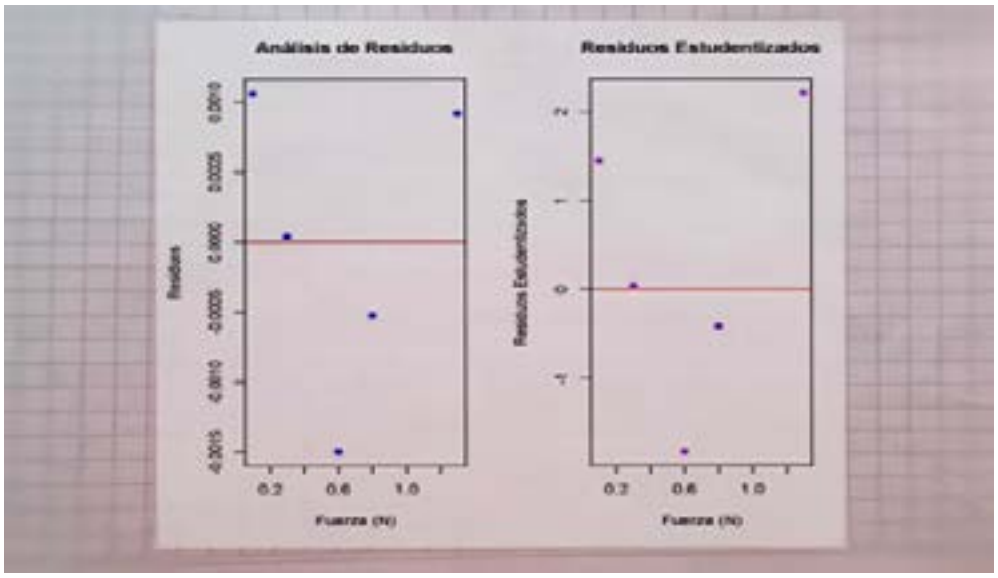


Figura5: protocolo 4 gráfico de residuos

Se observó que el modelo ajustado no pasaba por el origen de coordenadas; por lo tanto, para validar la adecuación de los datos experimentales al modelo de la ley de Hooke, se decidió realizar un test de hipótesis para evaluar si el término independiente β_0, del modelo verdadero, era distinto de cero. Este test arrojó un p-valor superior a 0.05, lo que indicó que no había evidencia suficiente para afirmar que el modelo de Hooke no fuera apropiado.

Para concluir, los estudiantes participaron en una encuesta destinada a evaluar en qué medida la integración de herramientas estadísticas con los enfoques de Física 1 había mejorado su aprendizaje. En relación al análisis del Gráfico 1, más del 60% de los estudiantes consideró que la experiencia en Estadística les proporcionó herramientas útiles para complementar su comprensión de la constante del resorte en Física 1. En contraste, un 20.8% opinó que el aporte fue limitado, mientras que solo un 4.2% sintió que no hubo un aporte significativo. Este análisis sugiere que los estudiantes reconocen el valor de la Estadística para abordar la variabilidad en los experimentos, aunque algunos aún podrían no ver la relación directa con la aplicación en Física 1, especialmente en lo que respecta a la comprensión de la constante del resorte. En cuanto al análisis del Gráfico 2, se desprende que trabajar con los datos experimentales de la Ley de Hooke fue sumamente beneficioso para la mayoría de los estudiantes. Un 54.2% lo consideró bastante útil y un 45.8% lo vio como muy útil. Esto indica que la experiencia práctica de trabajar con datos reales fortaleció su capacidad para aplicar conceptos estadísticos y desarrolló una comprensión sólida del proceso de modelado en Estadística.



Gráfico.1: grado de aportes de la propuesta al tratamiento de la constante



Gráfico.2: grado de aportes a la comprensión del tratamiento del modelo lineal

Resultados y Conclusiones

Los resultados de la encuesta revelaron que más del 60% de los estudiantes valoraron la Estadística como un complemento fundamental para comprender la Ley de Hooke. Sin embargo, muchos estudiantes enfrentaron notables dificultades debido a las diferencias en la representación y el tratamiento de datos entre las asignaturas de Física 1 y Estadística. Esta confusión inicial se relacionó, en parte, con el uso de variables invertidas, dificultando la comprensión del ajuste lineal y su interpretación. Al abordar la estimación de la constante k del resorte, la discrepancia entre los enfoques de ambas disciplinas se hizo aún más evidente. En Física 1, el intervalo de incertidumbre para k se calcula mediante un enfoque empírico y analítico, tomándose en cuenta las incertidumbres instrumentales y aplicando la propagación de errores de manera directa. En cambio, dentro del marco de la Estadística, es necesario obtener primero el intervalo de la pendiente β_1, que está inversamente relacionada con la constante k, mediante un ajuste de regresión lineal. Muchos estudiantes que intentaron invertir este valor para calcular k cometieron errores que resultaron en interpretaciones incorrectas de sus resultados. Además, es importante destacar que mientras que en Física 1 el análisis de errores se enfocaba primariamente en las incertidumbres de las mediciones instrumentales, en Estadística se introducen elementos como la variabilidad de los datos y el error muestral.

Los estudiantes aprendieron técnicas avanzadas como el análisis de residuos, cálculo de intervalos de confianza y test, lo que les permitió comprender mejor la discrepancia entre los datos experimentales y los modelos teóricos. Aunque algunos enfrentaron dificultades, la mayoría valoró la integración de la Física y la Estadística para analizar la Ley de Hooke de manera más completa. Trabajar con datos experimentales reales no solo consolidó su

entendimiento del fenómeno, sino que también mejoró sus habilidades en el modelado de regresión lineal simple.

Esta experiencia resaltó la importancia de abordar la enseñanza de la Física y la Estadística de manera interconectada, evidenciando que tal integración no solo es enriquecedora, sino esencial en el desarrollo de competencias científicas en los estudiantes. El escenario identificó, además, que la enseñanza activa, donde los estudiantes se involucran en el proceso de aprendizaje a través de experimentos y simulaciones, puede contribuir significativamente a mejorar su capacidad para aplicar ambos conceptos. De esta manera, se fomenta un ambiente de aprendizaje más dinámico y adaptativo, que prepara a los estudiantes para los desafíos que enfrentarán en contextos científicos reales.

Bibliografía

Batanero, C., Diaz, J., Green, D., Holmes, P. y Vallecillos, A. (1994). Errors and difficulties in understanding elementary statistical concepts. *Internation Journal of Mathematics Education in Science and Technology*, **25 (4)**, 527-537.

Cozzarin, A., Devece, E., Feloy, L., Torroba, P. y Trípoli, M. (2023) Ley de Hooke: Un punto de encuentro entre Matemática A, Física I y Materiales. *Actas de las 7mas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería de la UNLP*, 105-110. ISBN 978-950-34-2256-4.

Fanaro, M.A. y Suasnábar, J.M.V. (2021). Conversaciones interdisciplinarias para la Formación Docente Universitaria: un desafío para pensar la práctica en el contexto actual. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte; Cadernos de Estagio*; 3; 2; 12-2021, 133-144. e-ISSN: 2763-6488

Montgomery, D.C., Pek, E.A. y Vining, G.G. (2006). *Introducción al Análisis de Regresión Lineal*. 3ª. Edición, Ed. Compañía Editorial Continental, México.

Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (1993). *Física. Vol 1*., 6ta edición. México: C.E.C.S.A.

Torroba, P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2017). 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*, **28**(Número Extra), 91-99.

Torroba, P., Trípoli, M., Devece, E. y Aquilano, L. (2019). Funciones trigonométricas, periódicas y oscilatorias: una propuesta de trabajo interdisciplinario. *Actas de las 5tas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.* 166-171.

UNA REFLEXIÓN SOBRE LA MODALIDAD DE TRABAJO EN MATEMÁTICA A DESDE LA VOZ DE LOS ESTUDIANTES

Tulio Semento Tulio & Langoni Laura

Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47 (B1900TAG), La Plata, Buenos Aires, Argentina

tulio.semento@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Matemática A es la segunda materia de matemática que cursan los estudiantes de las trece carreras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y corresponde al primer semestre del primer año de todos los planes de estudio. Aunque, también, se ofrece nuevamente en el segundo semestre, permitiendo a los estudiantes organizar su trayectoria académica en función de sus necesidades. Debido al gran número de inscriptos —alrededor de 1400 en el primer semestre y 900 en el segundo, según datos de 2023—, se conforman dieciocho comisiones durante el primer semestre y diez en el segundo.

La cursada de Matemática A, como la de todas las asignaturas de primer año, constituye una etapa clave en el proceso de afiliación de los estudiantes a la vida universitaria y a la dinámica académica de la Facultad de Ingeniería. Durante su cursada, los estudiantes enfrentan importantes desafíos, tanto en lo académico como en lo personal, ya que se trata de una etapa de transición desde las prácticas propias de la escuela secundaria hacia las exigencias y metodologías del nivel superior.

Este trabajo se centra en la modalidad de trabajo de Matemática A basada en el aprendizaje activo y colaborativo que, de acuerdo con Ander-Egg, será denominada a lo largo del trabajo como aula-taller. Este enfoque de la enseñanza marca una ruptura con los métodos expositivos tradicionales predominantes en la educación secundaria, a los que muchos estudiantes están habituados. Con el fin de poner en práctica esta modalidad, la Cátedra desarrolló un material didáctico en el que los contenidos no se presentan de forma expositiva, sino que fomentan la construcción activa del conocimiento. Siguiendo esta línea, el aula-taller demanda a los estudiantes una lectura reflexiva y un esfuerzo considerable, lo cual representa un gran desafío para los estudiantes noveles que comienzan la cursada de Matemática A.

Este artículo tiene como objetivo conocer y analizar las experiencias de los estudiantes que cursaron Matemática A bajo la modalidad de aula-taller, centrándose en sus percepciones sobre la forma de trabajo. Se realizó un estudio cualitativo con enfoque fenomenológico a través de entrevistas semiestructuradas sobre aspectos esenciales del aula-taller, un enfoque que, como señalan Hernández Sampieri et al. (2014): “tiene como propósito principal explorar, describir y comprender las experiencias de las personas” (p. 493), en este caso, de estudiantes de Matemática A. Se buscó dar voz a los estudiantes, con la convicción de que sus testimonios ofrecen una perspectiva fundamental para reflexionar sobre la propuesta pedagógica.

Sobre el aula-taller

El aula-taller consiste en un espacio de aprendizaje colectivo, donde se integran la teoría y la práctica en un proceso de construcción conjunta. Según Ander-Egg (1991), “se trata de una forma de enseñar y, sobre todo, de aprender, mediante la realización de ‘algo’ que se lleva a cabo conjuntamente. Es aprender haciendo en grupo” (p. 10). En este modelo, los estudiantes construyen conocimientos desde su propia producción, desplazándose el rol central del docente hacia una figura de guía que estimula y moviliza preguntas, como señala Bongarrá (2010): “el aula-taller se fundamenta en el aprendizaje activo, es una nueva forma de aprender que difiere de la ‘tradicional’, donde es el alumno el que se apropia de los conocimientos y el docente juega las veces de coordinador u observador” (p. 38).

En este espacio, tanto docentes como estudiantes participan activamente, donde la pregunta y la negociación de significados toman un rol protagónico. Según Pasel y Asborno (1993), el aprendizaje activo requiere integrar teoría y práctica, transformando el aula en un taller. De Vicenzi (2008) refuerza esta idea al señalar que “el aula-taller constituye un escenario para aprender haciendo, a partir de la negociación de significados entre el docente y los alumnos” (p. 42). Así, en Matemática A se redefinen los roles tradicionales, impulsando una construcción colectiva de conocimientos matemáticos que se introducen a partir de la necesidad de comprenderlos para dar solución a problemas propios de los campos de la ingeniería.

Metodología

Se realizó un estudio cualitativo con enfoque fenomenológico a través de entrevistas semiestructuradas con el fin de explorar en profundidad las experiencias y percepciones de los estudiantes, proporcionando una visión detallada, rica e interpretativa de sus vivencias (Hernández Sampieri et al., 2014). El enfoque fenomenológico tiene como “propósito principal explorar, describir y comprender las experiencias de las personas” (Hernández Sampieri et al., 2014, p. 493). Para ello, se realizaron entrevistas semiestructuradas a estudiantes de cuatro comisiones de Matemática A durante el primer semestre de 2023. Las entrevistas fueron llevadas a cabo con grupos de estudiantes que compartieron mesa y equipo de trabajo durante el semestre, con un promedio de seis integrantes por grupo. Con una duración de entre 15 y 25 minutos, las entrevistas permitieron a los estudiantes profundizar en diversas dimensiones de su experiencia. El entrevistador, adoptando un rol de facilitador, se limitó a estimular la conversación (Tonon, 2012), dando espacio para que los estudiantes expusieran sus percepciones. Aunque se partió de preguntas disparadoras, el curso de la conversación se ajustó según las respuestas de manera que profundizaran en temas emergentes. El objetivo principal fue que los estudiantes compartieran su experiencia y valoración de Matemática A, abordando temas como el trabajo en grupo, el rol docente, las aulas, el material didáctico, los exámenes y la filiación universitaria.

Para sistematizar las experiencias y opiniones expresadas, se transcribieron las entrevistas (Semento, 2024) y luego se establecieron categorías basadas en los temas recurrentes y áreas de interés que emergieron en sus relatos. Este enfoque permite ofrecer una visión clara de sus percepciones e identificar patrones clave en relación con la modalidad de trabajo.

Resultados y discusión

El análisis permitió organizar las respuestas de los estudiantes según ejes temáticos, facilitando la identificación de experiencias relacionadas con diferentes aspectos de la modalidad. Esta organización permitió captar tanto las experiencias comunes como los matices personales, revelando las diversas maneras en que los estudiantes atravesaron la modalidad de trabajo.

1) Adaptación a la modalidad, su demanda y exigencias.

La mayoría de los estudiantes indicó que la adaptación a la modalidad de trabajo representó un desafío. Muchos de ellos destacaron que se trataba de su primera experiencia con este tipo de modalidad. Un estudiante comentó: *"Bueno, al principio costó. Pero después sí, lo fuimos llevando bien".* Algunos estudiantes incluso expresaron que la forma de trabajo les resultó extraña al principio. Uno de ellos mencionó: *"A mí al principio me parecía medio raro lo de que sea tan así preguntar en la mesa, o sea, que cada uno tenga que preguntar y no todo el tiempo enfrente de todos en la clase, digamos. Pero después, al final me gustó".* Estos testimonios evidencian que, aunque la modalidad fue inicialmente desafiante para algunos, en general los estudiantes lograron adaptarse de manera favorable. A su vez, muchos estudiantes subrayaron las exigencias y demandas inherentes a la modalidad de aula-taller. Las percepciones acerca de estas exigencias son variadas, pero algunas de ellas resaltan el esfuerzo adicional que implica el trabajo autónomo y la necesidad de una mayor dedicación por parte de los estudiantes. En este sentido, un estudiante destacó la necesidad de trabajar de manera autónoma durante la clase para aprovechar mejor la exposición del docente: *"Era eso: trabajar antes un montón más en el libro. Pero bueno, después estaba bueno que entendías […] todo lo que decía el profesor. Lo que decía el pizarrón lo podías entender".* Estos comentarios reflejan la intensidad de trabajo y el compromiso requeridos en esta modalidad, en la que los estudiantes no solo deben enfrentarse a contenidos complejos, sino también a un ritmo y una forma de aprendizaje que exige un esfuerzo constante y cierta autonomía.

2) El ritmo universitario y los hábitos de estudio

Los estudiantes mencionaron que el ritmo de trabajo en la universidad, especialmente en Matemática A, difiere considerablemente de la experiencia en el colegio secundario. Un estudiante destacó: *"Me complicó un poco el ritmo tan acelerado de la materia".* Otro comentó: *"Por ahí el ritmo, viste... de pasar del cole, estar más tranquilo y después acá todos los días tarea, tarea, tarea y llegar a tu casa y repasar porque si no te quedabas atrás".* Además, algunos señalaron que la necesidad de estudiar constantemente fue un desafío en comparación con sus hábitos previos: "*Capaz que era como un salto muy grande digamos de las cosas que nos daban en el colegio a todo lo que te dan en la Facultad… es ahora, como mucho más complicado, pero por eso como que es un salto muy grande de sexto al primer año de la facu"*. La mayoría coincidió en que la universidad exige una organización del tiempo y una dedicación diaria que no experimentaban en la secundaria: *"No es lo mismo que el colegio, porque nosotros te juro que la mayoría, el último año en el colegio, no hizo nada por la cuestión de que estaba en sexto y ahora llegar, tenés que sentarte a estudiar".* Estos comentarios reflejan la dificultad de adaptarse al ritmo intenso y a la exigencia del estudio universitario.

3) Trabajo en equipo, sinergia grupal y construcción de un grupo de estudio y amistades

Durante las conversaciones, los estudiantes subrayaron la importancia del trabajo en equipo, la creación de un grupo de estudio y amistades dentro de la modalidad aula-taller. Valoraron positivamente la oportunidad de colaborar con sus compañeros y la construcción de un entorno de apoyo mutuo. Este proceso no solo facilitó su aprendizaje académico, sino que también les permitió establecer vínculos con otros estudiantes, creando grupos de estudio e incluso forjando amistades. Como mencionó uno de los estudiantes: *"Pudimos formar un grupo. Incluso ahora tenemos una amistad y eso es mucho más fácil para poder hacer las cosas".* Otro destacó: *"La modalidad de las mesas estuvo buena porque se fueron armando grupos y cada uno se fue armando su grupo, relacionándose y conociendo más gente".*

De este modo, la modalidad no solo contribuyó al desarrollo académico de los estudiantes, sino que también fortaleció su afiliación universitaria de los cursantes de Matemática A. Como reflexionó una estudiante: *"Al principio, en mi caso, venía muy nerviosa a la facu, soy del interior, entonces no conocía a nadie y todos los días tenía nervios. [...] con el tiempo, al conocer a los chicos, me pareció lindo venir a la facu porque sabía que la iba a pasar bien, me iba a reír, iba a entender. El grupo fue espectacular para el trayecto".*

La colaboración en los grupos de trabajo permitió no solo la resolución de dudas, sino también la posibilidad de ver diferentes puntos de vista y enfoques sobre los contenidos. Como señaló un estudiante: *"Y mirar tal vez un tema o algún ejercicio desde varias perspectivas, porque tal vez no todos lo entienden o lo harían de la misma manera. Entonces, tener la posibilidad de compartir con otras personas cómo lo harían ellos, ayuda".* Otro estudiante expresó: *"Tenías otros puntos de vista que por ahí vos no podías ver".* Este intercambio de ideas y perspectivas enriqueció el aprendizaje de todos los miembros del grupo. En palabras de otro estudiante*: "Creo que ayudaba esto de cuando uno no entendía algo, reforzaba lo que no entendió con las ideas de los otros. Y por ahí, muchas veces, entre nosotros mismos nos íbamos explicando y cuando uno mismo explica, le queda mucho más en la cabeza".* También valoraron la sinergia establecida entre los alumnos de un mismo grupo de trabajo: *"…tal vez uno presentaba una duda, discutíamos entre todos y la logramos discernir entre todos nosotros y después no hacía falta que venga la profesora".*

Finalmente, los estudiantes coincidieron en que, sin el trabajo en grupo, el proceso de aprendizaje habría sido más difícil. Como señaló uno: *"Lo bueno que tiene esta materia es el tema de los compañeros y el trabajo en grupo. Yo creo que sin los compañeros no hubiese sido lo mismo. Nos ayudamos todos con todos".* Además, como mencionó otro, trabajar en grupo también hizo que la cursada fuera más amena: "*Trabajar en grupo […] te puede hacer la cursada más llevadera, si tenés una duda ya presentarla a tus compañeros".*

4) Resistencias frente a un enfoque no tradicional

Algunos estudiantes expresaron cierta resistencia a la modalidad aula-taller, manifestando una preferencia por clases «más tradicionales». Estos estudiantes tendían a valorar más la repetición y mecanización de contenidos, mostrando menor aprecio por el enfoque constructivo y activo de la modalidad. Se sintieron incómodos con el rol proactivo y exigente que la modalidad de cursada de Matemática A les demandaba. En lugar de este enfoque, expresaron que preferirían recibir una introducción teórica del docente antes de abordar los ejercicios prácticos, ya que consideran que esta metodología es más rápida y sencilla para

comprender los conceptos. Un estudiante comentó: *"Que den primero explicación y después pasamos a resolver el libro. Para mí, debería ser explicación primero y te ayudás con el libro y ahí ya entendés y te ponés a resolver y a partir de ahí ya hacés dudas puntuales y preguntas sobre algo que no hayas entendido".* Otro dijo: *"Hubiese preferido que los profesores ya dieran un pantallazo antes de pasar al libro, así ya estábamos mejor preparados porque usualmente tiene mucho vocabulario el libro y como que lo tenés que ir digiriendo".* Estas declaraciones reflejan, por un lado, una preferencia por un enfoque más estructurado y guiado, que reduzca el esfuerzo que implica enfrentarse al trabajo autónomo. Por otro lado, dejan en evidencia la importancia de considerar las distintas formas en que los estudiantes abordan y construyen su aprendizaje.

5) El rol de los docentes como guías en el proceso de aprendizaje

Los estudiantes resaltaron la importancia del rol de los docentes en su proceso de aprendizaje, destacando la dedicación, la empatía y la guía que recibieron. Un estudiante expresó: *"Los profes se ponían en nuestro lugar y como que nos explicaban muy a fondo".* Otro señaló: "*Se nota mucho la dedicación que tienen y realmente las ganas que tienen de que vos aprendas".* Además, varios mencionaron que la presencia y el apoyo constante de los docentes fue clave para su comprensión: *"Ellos realmente se sentaban y te explicaban. Y querían un bienestar, también se notaba, emocional".* Un comentario de otro estudiante reflejó la importancia de este acompañamiento: *"La verdad es que la ayuda de los profesores nos re sirvió porque nada… por lo que decimos de que el libro por ahí a veces cuesta mucho entenderlo. Estar con los profesores, que vengan, nos expliquen, nos sirvió un montón".* Los estudiantes subrayan cómo el compromiso, la empatía y la dedicación de los docentes no solo facilitan la comprensión de los contenidos, sino que también generan un entorno de aprendizaje más humano y motivador.

6) Apreciaciones en torno al material didáctico de Cátedra

Como fue mencionado, el Material didáctico de la Cátedra no es expositivo, sino que estimula la construcción de los conocimientos por parte de los estudiantes. Las valoraciones en torno al material fueron variadas algunos estudiantes valoraron el enfoque constructivo del material, destacando su capacidad para estimular el razonamiento y el desarrollo autónomo de habilidades. Un estudiante mencionó: *"Es como que te estimula a tener que vos razonar la teoría y plantear algo, pero a la vez muchas veces se nos re complicaba. Tipo está buena la idea, pero capaz (podría ser) un poquito más simple."* Otro comentó: *"Lo que veíamos en el cuadernillo era siempre la teoría que estaba planeada para que la construyéramos nosotros a través de las actividades".* Sin embargo, otros manifestaron que el material les resultaba difícil de comprender. Un estudiante opinó: *"Para mí, la guía, en este caso, el cuaderno de Mate A, estaba como un poco medio rebuscado, capaz como para recién arrancar, nos mató un toque".* A pesar de estas críticas, muchos coincidieron en que el material les obligaba a ser más autónomos y a buscar comprensión a través de la consulta con profesores o compañeros: *"Yo creo que (el material didáctico de la Cátedra) te obliga a que tengas que consultar, ya sea con un profesor o con tus mismos compañeros".* En general, se destacó que el material no era simplemente expositivo, sino que fomentaba una participación activa, aunque algunos estudiantes indicaron que tal enfoque podía resultar desafiante y demandante.

Conclusiones

A partir de los testimonios recogidos, se puede concluir que la experiencia de los estudiantes en la modalidad aula-taller de Matemática A implicó una adaptación importante a un enfoque de aprendizaje no tradicional, que requirió un esfuerzo considerable para desenvolverse de manera autónoma y colaborar activamente con sus compañeros. Si bien al principio muchos estudiantes encontraron desafiante este modelo, sobre todo por la ausencia de una estructura clásica, la mayoría logró adaptarse positivamente con el tiempo, reconociendo las ventajas de este enfoque. Sin embargo, algunos estudiantes aún prefirieron una enseñanza más tradicional, donde el protagonista sea el docente, lo que resalta la diversidad en los estilos de aprendizaje y la importancia de ofrecer alternativas que acomoden a distintos perfiles de estudiantes. Estos resultados invitan a reflexionar sobre la necesidad de diseñar estrategias pedagógicas que faciliten la transición hacia enfoques innovadores.

El ritmo académico universitario también resultó ser un aspecto fundamental en la adaptación, ya que los estudiantes destacaron un salto considerable en cuanto a la intensidad y la constancia requerida en comparación con la secundaria. Los testimonios reflejan la necesidad de una preparación previa y un compromiso diario que, aunque demandante, contribuyó al desarrollo de habilidades de gestión del tiempo y de resolución de problemas. Los estudiantes destacaron la empatía, dedicación y disponibilidad de los profesores para guiarlos durante este proceso. Los docentes no solo fueron vistos como facilitadores del conocimiento, sino como apoyo constante que permitió a los estudiantes enfrentar los desafíos del curso con mayor confianza.

Este trabajo ha sido una experiencia enriquecedora, subrayando la importancia de escuchar las voces de los estudiantes para orientar las prácticas docentes hacia sus necesidades. Es crucial reconocer que los estudiantes de primer año enfrentan desafíos tanto académicos como personales, que van más allá del aprendizaje de conceptos matemáticos, para poder facilitar su adaptación.

Bibliografía

Ander-Egg, E. (1991). *El taller: una alternativa de renovación pedagógica.* Buenos Aires, Argentina: Editorial Magisterio del Río de La Plata.

Búcari, N., Langoni, L., Vallejo, D. (2013). *Cálculo diferencial*. La Plata, Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP)

Bongarrá, C. (2010) El aula-taller como estrategia de enseñanza. En Reflexión Académica en Diseño y Comunicación. Universidad de Palermo, Buenos Aires, Argentina.

De Vicenzi, A. (2009) *La práctica educativa en el marco del aula taller*. Revista de Educación y Desarrollo.

Hernández Sampieri, R.; Fernández Collado, C.; Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill Interamericana.

Pasel, S; Asborno, S. (1993) *Aula-taller*. Argentina: Editorial Aique.

Semento, T. (2024). *Un relevamiento sobre las percepciones de estudiantes de Matemática A acerca de la metodología aula-taller utilizada en la materia.* Recuperado a partir de http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/170170

Tonon, G. (2012). *Reflexiones latinoamericanas sobre investigación cualitativa. Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales, Niñez Y Juventud*. Recuperado a partir de: https://revistaumanizales.cinde.org.co/rlcsnj/index.php/Revista-Latinoamericana/article/view/606

MATERIAS MASIVAS DE MATEMÁTICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA: ACCIONES PARA LA PERMANENCIA

Vagge, Mariana[1]; Langoni, Laura; Di Domenicantonio, Rossana

[1] Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47, La Plata (B1900TAG), Buenos Aires, Argentina
mariana.vagge@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Las materias Matemática para Ingeniería (Matemática PI) y Matemática A son las dos primeras materias de Matemática que cursan todos los alumnos de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Durante el año 2023, entre ambas, se registraron más de seis mil inscripciones lo que evidencia la masividad de ambas asignaturas como se ve en la Tabla 1. En cada semestre, se inscriben alumnos que realizan las materias por primera vez y también alumnos que repiten la cursada.

Tabla 1. Cantidad de alumnos inscriptos y comisiones del año 2023.

Año 2023	Matemática PI	Matemática A
Modalidad intensiva	1470 (15 comisiones)	----
1º semestre	1144 (14 comisiones)	1411 (18 comisiones)
2º semestre	1367 (15 comisiones)	974 (10 comisiones)
Total anual	3981	2385

Al ser dos materias de primer año y teniendo en cuenta que los contenidos matemáticos pueden resultar complejos para algunos estudiantes, es importante planificar e implementar estrategias de retención en las dos asignaturas. En este trabajo se describirán algunas estrategias realizadas por las cátedras y por la institución con el objetivo de promover la retención y permanencia de los estudiantes. Además se mostrarán resultados cuantitativos y algunas reflexiones sobre la implementación de estas acciones.

FUNDAMENTACIÓN

El problema de la deserción o el abandono en la educación superior es un fenómeno complejo con distintos matices y aristas. Las causas de la deserción no sólo son de índole individual, sino que se pueden encontrar también factores socioeconómicos, culturales e incluso institucionales que influyen en la permanencia de los estudiantes [1].

La perspectiva de Tinto [2] acerca de la retención en la educación superior tiene en cuenta el rol del entorno, en particular de la institución, en las decisiones de los estudiantes de permanecer o abandonar sus estudios. De acuerdo con este autor, varios investigadores identifican los contextos que más favorecen la retención, especialmente durante el primer año universitario. Según el modelo de este autor, “es más probable que los estudiantes aprendan y permanezcan en contextos que mantienen altas expectativas de su aprendizaje, que proveen el apoyo académico y social necesario y una retroalimentación frecuente de su aprendizaje, contextos en los que los estudiantes participan activamente con docentes y pares en actividades de aprendizaje relevantes, en particular en las aulas de clase, laboratorios y estudios de la facultad” [2].

Tinto [2] considera que para promover las condiciones para el aprendizaje y la retención, las universidades deberían organizar el primer año conformando comunidades de aprendizaje. Las comunidades de aprendizaje se componen de alumnos que se anotan en las mismas materias, estudian en grupo y participan activa y responsablemente en el aprendizaje de sus pares. Estas comunidades se extienden fuera del ámbito de la Facultad e incluso el trabajo compartido de sus miembros continúa a lo largo de las carreras. El trabajo colaborativo de los

alumnos es una manera de que el esfuerzo necesario para aprender resulte más ameno, de enriquecer el aprendizaje y promover el compromiso con su comunidad y la institución.
Lodola [3] aborda la cuestión de la masividad en el sistema universitario argentino criticando posiciones que sostienen que para mejorar la eficiencia del sistema debe reducirse la masividad limitando el ingreso. Frente a ello, el autor argumenta que la reducción del ingreso implica un sesgo en la selección de los ingresantes en perjuicio de aquellos provenientes de los sectores más vulnerables. El autor concluye que para resolver la tensión entre masividad y terminalidad, es necesario mejorar las condiciones del tránsito entre la escuela media y la universidad y proveer estímulos que reduzcan la deserción.
El estudiante que ingresa a la vida universitaria no solo debe enfrentar el aprendizaje de los contenidos disciplinares específicos, sino que también necesita conocer y adaptarse a una organización y cultura diferentes. Este proceso es gradual y requiere un esfuerzo conjunto por parte del propio estudiante, su familia y la institución a la que ingresa. Según Walker, "el ingreso a la universidad supone un encuentro (o desencuentro) con un campo disciplinar específico y con una cultura institucional que requieren de aprendizaje de sus lenguajes, sus saberes y sus costumbres" [4]. La autora señala las diferencias que esta nueva etapa presenta en comparación con la experiencia previa, destacando aspectos como la exigencia curricular, la acumulación de tareas, los requisitos de asistencia, la flexibilidad en los planes de estudio y la mayor cantidad de responsabilidades. De acuerdo con Malinowski [5], la "afiliación" es esencial para el éxito académico y este proceso no solo requiere constancia y trabajo personal, sino también un esfuerzo de socialización y la adhesión a una identidad colectiva estudiantil, lo que facilita la adaptación a los códigos de la educación superior.

DESARROLLO

Se describen a continuación las distintas acciones que se implementan en la Facultad de Ingeniería, en particular en Matemática PI y Matemática A.

Planificación de calendario, bandas horarias y organización por carreras

En la FI se organiza en comisiones a los ingresantes según la carrera de ingeniería en la que se anotaron. De esta manera los estudiantes cursan junto a sus pares que serán, en principio, compañeros durante la carrera. Esta estrategia fomenta el armado de grupos de estudio que comparten también actividades sociales en la ciudad de La Plata donde decidieron residir quienes son estudiantes de otras ciudades, provincias o países y promueve en los estudiantes un vínculo social que favorece la permanencia en la institución. Esta estrategia conlleva una importante gestión de recursos, tanto áulicos como docentes. A su vez se ofrecen bandas horarias de cursado que facilita al estudiante que tenga otras responsabilidades prefijadas como ser horarios laborales pueda asistir a las cursadas.
El calendario académico de la FI dispone los tiempos de cursada y las semanas de evaluaciones (Tabla 2).

Tabla 2. Semanas de cursada y evaluaciones en un año calendario.

Matemática PI en semanas	Modalidad intensiva	4 de clases - 1 de evaluaciones
	1º y 2º semestre	6 de clases - 1 de evaluaciones y consulta - 5 de clases - 2 de evaluaciones y consulta
Matemática A en semanas	1º y 2º semestre	6 de clases - 3 de evaluaciones y consulta - 7 de clases - 3 de evaluaciones y consulta

Este calendario no superpone las semanas donde se dictan contenidos nuevos con las semanas de evaluaciones parciales. Esto permite que los estudiantes puedan dedicar más tiempo al estudio previo a las evaluaciones parciales.
Tanto en la institución como en cada una de las materias se utiliza la página web de la Facultad y las redes sociales para difundir el calendario académico, el inicio de clases en cada período lectivo, entre otras novedades, fechas de parciales, información sobre becas, con el objetivo que los estudiantes las aprovechen en su totalidad. Asimismo, cada cátedra tiene un correo electrónico oficial al que los alumnos, con alguna situación particular, pueden escribir para ser asesorado al respecto. Estas acciones resultan importantes en cátedras masivas de primer año pues facilitan la adaptación del estudiante a la vida universitaria ya que les permite

acceder de manera más inmediata a la información y combinar sus tiempos de estudio con otras actividades personales.

Metodología de trabajo en el aula

En las asignaturas Matemática PI y Matemática A se promueve el dictado de clases con modalidad de aula taller. De acuerdo con Ander-Egg [6], el aula taller se trata de una forma de "aprender haciendo" o "aprender por descubrimiento", en contraposición con la enseñanza tradicional, donde la enseñanza se centra principalmente en la transmisión de conocimientos teóricos. Esto requiere de una actitud práctica y participativa por parte del alumno en la apropiación de los conocimientos y del trabajo colaborativo entre los estudiantes. En esta modalidad de trabajo en el aula, el rol del docente es el de acompañar y guiar en el descubrimiento de los nuevos saberes y se enfatiza el aprendizaje experiencial y la aplicación práctica de los conceptos aprendidos.

Entre las características del aula taller se incluyen: trabajo en un espacio físico adecuado, el enfoque práctico, la integración de la teoría y la práctica y el desarrollo de habilidades transversales como pueden ser el trabajo en equipo, la resolución de problemas, la creatividad y la comunicación efectiva. Para llevar adelante esta modalidad en Matemática A y Matemática PI, se utilizan aulas con mesones grandes donde se fomenta el trabajo en grupo de los estudiantes y se utiliza un material de cátedra especialmente diseñado para este tipo de metodología. Este trabajo en grupo contribuye a la conformación de las comunidades de aprendizaje mencionadas por Tinto [2]. En estas dos materias se conforma un equipo de cuatro docentes para cada una de las comisiones, que trabajan en forma colaborativa. De acuerdo con De la Barrera "las prácticas docentes colaborativas generan un ambiente favorecedor de innovaciones pedagógicas sustantivas en la universidad" [7].

Si bien al iniciar la cursada muchos estudiantes se ven sorprendidos con esta forma de aprender, luego, en su mayoría se apropian de esta forma de estudiar. Esto se ve de manifiesto en los resultados de una encuesta realizada previo al cierre de un semestre donde 255 estudiantes de distintas comisiones de Matemática A expresaron su opinión sobre la metodología de aula taller. En la Figura 1 podemos ver que del orden del 80% de los alumnos consideran positiva a la metodología de enseñanza utilizada.

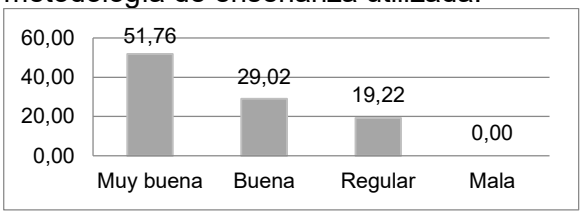


Figura 1. Percepción de los alumnos sobre la modalidad de aula taller.

En la Figura 2, observamos que los estudiantes destacan principalmente el trabajo grupal y la consulta personal al docente como aspectos que influyeron positivamente en su rendimiento.

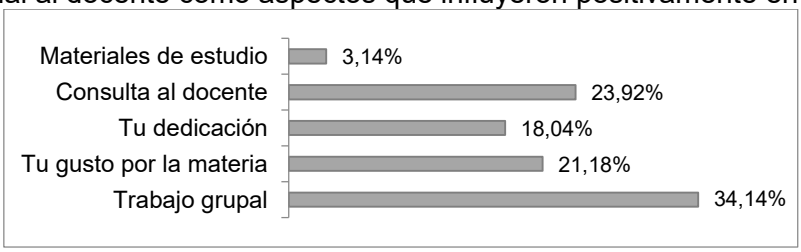


Figura 2. Factores que los estudiantes consideraron de impacto positivo en su rendimiento.

Redictados

La masividad de estas dos materias ocasiona que aun teniendo un gran número de estudiantes que promocionan, también hay un importante número de alumnos que abandonan o desaprueban. Como los estudiantes en esta última condición deben rehacer la materia, Matemática Pi y Matemática A ofrecen nuevos dictados en distintos períodos del año (Tabla 2). Matemática Pi se dicta tres veces al año, dos modalidades trimestrales y una modalidad intensiva de cinco semanas. Matemática A se dicta en dos modalidades cuatrimestrales al

año. Estos redictados contribuyen en cierta medida a la retención dado que no se necesita esperar todo un año para volver a cursar la asignatura y esto promueve que los alumnos mantengan una continuidad en el estudio y el nexo con la institución.

Dictados especiales

Modalidad especial en un grupo de Matemática A

A lo largo de los años se han detectado diferentes porcentajes de aprobados en Matemática A de acuerdo con las características particulares de los distintos grupos: la rama de la ingeniería que están estudiando, si el curso está conformado por estudiantes que hacen la materia por primera vez, si se trata de alumnos que están recursando por primera o más veces la asignatura, la banda horaria en la que cursan, entre otros. En particular, la banda horaria más tardía es, en general, elegida por aquellos estudiantes que trabajan y que entonces tienen otras ocupaciones que les "quitan" horas de estudio.

En el primer semestre Matemática A cuenta con un grupo en el cual se cursa en la franja horaria de 16 a 20 h y al que asisten alumnos que hicieron la materia en varias oportunidades. Esta comisión contaba con los porcentajes más bajos de aprobación y con una gran deserción a lo largo del semestre lo que generaba un desánimo tanto en los docentes del grupo como en los estudiantes que continuaban cursando. Sabiendo que gran parte del "fracaso" estaba dado por la poca asistencia a las clases y en vista de que la asistencia no es obligatoria para poder rendir los exámenes parciales, los docentes promovieron una alternativa en la modalidad de cursada de manera de motivar la permanencia de los estudiantes en el aula hasta el final del semestre. Es así que surge una modalidad donde los estudiantes pueden rendir "parcialitos" a lo largo de la cursada cuya aprobación les acredita los ejercicios de los temas correspondientes al momento de rendir el examen parcial. Para cada uno de los módulos de la asignatura, se seleccionaron cuatro temas para los parcialitos y el alumno debía cumplir con un 80% de asistencia para poder rendir estas evaluaciones. Es así que se generó una mayor asistencia a clase hasta el final del cuatrimestre, mejorando la dinámica de clases y los resultados al finalizar el semestre.

Realizamos la comparación entre los resultados de la aplicación de esta modalidad en el 1º semestre 2023/24 respecto a un promedio de lo ocurrido en los 5 años previos en el mismo grupo como puede verse en la Tabla 3. El porcentaje de alumnos que aprobaron es casi el doble de lo registrado en los 5 años anteriores en el grupo que atendió el mismo equipo docente, en la misma franja horaria y también con alumnos que cursaron varias veces la asignatura.

Tabla 3. Comparación de aprobados de la modalidad especial respecto a años anteriores.

Semestre	1° semestre 2018/19/20/21/22	1° semestre 2023/24
Inscriptos	521	189
Aprobados	86 (16,50%)	60 (31,75%)

Modalidad anticipada de Matemática PI

La materia Matemática PI se dicta tres veces al año. La modalidad intensiva del verano se cursa durante 5 semanas (la última semana de enero y todo el mes febrero) con clases de 20 horas semanales. Otra instancia es la que se dicta de marzo a junio que la cursan aquellos alumnos que no llegaron a cumplir los objetivos y se cursa 6 horas semanales.

La tercera instancia es la modalidad Anticipada que la pueden cursar estudiantes del último año del colegio secundario que aún no sean alumnos de una carrera de Ingeniería y es por ello que esa modalidad se llama "anticipada". A estos alumnos se los inscribe a la materia por un Google Forms y luego se asienta su nota cuando se inscriben a la FI.

Esta modalidad se dicta desde agosto a noviembre de manera presencial en las aulas de la facultad para estudiantes de la ciudad de La Plata y alrededores. Esta estrategia además de brindarle a los estudiantes la posibilidad de acreditar la asignatura, les facilita la oportunidad de familiarizarse con la dinámica universitaria, incluyendo la modalidad de estudio, el campus donde se encuentra la facultad, la biblioteca, la Secretaría de Bienestar Estudiantil, entre

otros. Esto resulta beneficioso para que el estudiante realice una transición más armoniosa desde la escuela secundaria a la universidad.
Se puede observar en la Tabla 4 que el porcentaje de alumnos de colegios secundarios que promociona en esta modalidad ronda el 40%. Además, se puede apreciar que más del 95% de alumnos que promociona, se inscribe en una de las carreras de nuestra institución.

Tabla 4. Resultados de alumnos de colegios secundarios inscriptos a la modalidad anticipada.

Período	Agosto 2022	Agosto 2023
Inscriptos	597	665
Promocionados	264 (44%)	261 (39%)
Inscriptos a FI	258 (98%)	250 (96%)

Modalidad a distancia de Matemática PI

En el contexto de la modalidad anticipada de Matemática Pi se pueden anotar alumnos del último año de colegios secundarios que residen a más de 60 kilómetros del radio de La Plata. A estos alumnos se les brinda la posibilidad de hacer la materia con una modalidad a distancia y evaluaciones presenciales. Para la cursada a distancia se diseñan cursos en la plataforma Moodle, que además de ser una de las plataformas más utilizadas en educación, es software libre y es la adoptada por la Institución. Esta plataforma educativa virtual brinda herramientas de actividades asincrónicas por medio de foros de preguntas y respuestas, cuestionarios, tareas, entre otros, con los que se diseñan actividades didácticas que fomentan el trabajo colaborativo entre estudiantes. Además, en estos cursos se completa la propuesta de enseñanza con encuentros sincrónicos. En las aulas virtuales se propone un trabajo activo en los foros de preguntas y respuestas, donde la interactividad es una característica fundamental. Cada año esta modalidad recibe del orden de 200 estudiantes pero no todos terminan la cursada ni rinden las evaluaciones presenciales. De los que rinden las evaluaciones promocionan la materia (sin contar los dos años de pandemia) en promedio del orden del 40% de ellos como se ve en la Tabla 5.

Tabla 5. Alumnos inscriptos en modalidad a distancia con resultados.

Semestre	2° 2018	2° 2019	2° 2020	2° 2021	2° 2022	2° 2023
Inscriptos	193	202	Todos por	virtuales pandemia	227	214
Rindieron	123	125			117	144
Promocionados	49 (40%)	52 (42%)			65 (56%)	47 (36%)

Curso para final

Para muchos estudiantes, Matemática A es la primera materia que deben acreditar por medio de un examen final. La preparación del examen es una tarea que puede resultar novedosa y difícil para un estudiante de primer año. Esta falta de experiencia se refleja en que parte de los alumnos que llegan a esta instancia no se preparan adecuadamente repercutiendo en un mal desempeño en la mesa de final.
Ante esa problemática, la cátedra decidió intervenir en busca de una solución, implementando un curso de apoyo para rendir el examen final. El curso procura ofrecer un espacio en el cual los estudiantes reciban la orientación de un docente de la asignatura que los acompañe en la preparación del examen, apuntando a que aprendan a estudiar de manera anticipada, ordenada y abordando los contenidos en profundidad, brindando también la posibilidad de hacerlo en un espacio participativo y de colaboración entre compañeros.
El curso se dicta una vez en cada semestre con la intención de preparar a los alumnos para las mesas de final de junio y de noviembre. Posee una modalidad de evaluación que permite a los alumnos aprobar los contenidos rindiendo evaluaciones durante el dictado del curso, lo cual los exime de rendir los temas correspondientes en el examen final. La duración del curso es de ocho semanas con dos clases semanales de dos horas y clases de consulta previas a las evaluaciones.
En la Figura 3 se muestra la comparación entre el porcentaje de aprobados sobre el total de alumnos que se presentaron a rendir el examen final de la asignatura sin haber realizado previamente el curso y el porcentaje de aprobados sobre el total que se presentó a rendir habiendo realizado el curso, para los años 2022 y 2023. Destacamos que el porcentaje de

alumnos aprobados en mesas de final entre alumnos que hicieron el curso es bastante mayor al de aprobados entre alumnos que no lo hicieron.

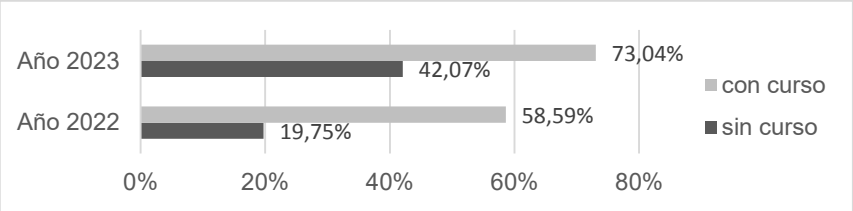


Figura 3. Porcentaje de aprobados sobre el total de alumnos que se presentaron a rendir el examen final en 2022/23.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos descrito una serie de acciones orientadas a fomentar la retención de alumnos en las dos primeras materias de matemática de la FI de la UNLP, mostrando resultados cuantitativos relativos a la implementación de tales acciones.

Los resultados mostrados, reflejan que las acciones desarrolladas contribuyen a promover la permanencia facilitando la adaptación de los estudiantes de primer año a la vida universitaria en diversos aspectos. Entre ellos hemos mencionado la optimización de tiempos de estudio mediante la organización del calendario y bandas horarias de cursada; la conformación de comunidades de aprendizaje mediante la metodología de aula taller. La conformación de estas comunidades permite a los estudiantes formar grupos de trabajo con sus compañeros, con los que participan en actividades de estudio y reciben una frecuente retroalimentación acerca de su desempeño por parte de sus docentes. Algunas de estas estrategias, como los redictados, los dictados especiales y el curso preparatorio para rendir examen final, promueven la permanencia de los estudiantes brindándoles apoyo académico.

Los resultados obtenidos generan asimismo un compromiso a los responsables y miembros de las cátedras de seguir trabajando en la implementación de estas acciones buscando nuevas iniciativas que contribuyan a mejorar las condiciones del tránsito de los estudiantes a la vida universitaria y promover su permanencia en la carrera.

REFERENCIAS

[1] Fernández de Morgado, N. (2009). Retención y persistencia estudiantil en instituciones de educación superior: una revisión de la literatura. *Paradigma*, 30(2), 39-62. Recuperado de: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1011-22512009000200004&lng=es&tlng=es.

[2] Tinto, V. (1999). Taking student retention seriously: Rethinking the first year of college. *NACADA journal*, 19(2), 5-9.

[3] Lodola, G. (2019). La tensión entre masividad y terminalidad en el sistema de educación superior. En J. Perczyk (ed.), *Reflexiones a 70 años de la gratuidad universitaria: políticas públicas y universidad* (187-212). Villa Tesei: Universidad Nacional de Hurlingham.

[4] Walker, V. S. (2012). *El tránsito de los estudiantes por la universidad.* Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net. Enciclopedia virtual. Recuperado de: https://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2012/10/que-es-plan-estudios.html

[5] Malinowski, N. (2008). Diferenciación de los tiempos estudiantiles e impacto sobre el proceso de afiliación en México. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, (2), 801-819.

[6] Ander-Egg, E. (1991). *El taller: una alternativa de renovación pedagógica*. Editorial Magisterio del Río de La Plata. Buenos Aires, Argentina.

[7] De la Barrera, S. (2007). Colaboración entre profesores: ¿quién dice que es fácil? *Colección de Cuadernillos de actualización para pensar la Enseñanza Universitaria*, 2(5), 1-17.

CARACTERIZACIÓN DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA ESTUDIANDO LA DENSIDAD DE VÓRTICES ÓPTICOS

Villamizar Amado, Astrid [1,2], Gulich, Damián [1,2], Cap, Nelly Lucía [1,3], Tebaldi, Myrian [1,2]

(1) Centro de Investigaciones Opticas (CONICET La Plata - CIC-UNLP), Camino Centenario y 506, Gonnet (La Plata), CP 1897, Buenos Aires, Argentina
(2) Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), calle 1 y 47, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina
(3) Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, calle 526 e/ 10 y 11, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina
maximiliano.gulich@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Estudiamos la propagación y la deformación dinámica de imágenes a través de la turbulencia atmosférica controlada en el laboratorio (turbulador). Para el estudio del proceso dinámico se emplea un método alternativo basado en las medidas de la densidad de vórtices ópticos en la propagación de imágenes. A partir de la secuencia de imágenes temporales que resultan de la propagación en atmósfera turbulenta se construye una nueva imagen bidimensional en intensidad o diagramas espacio-temporales (DET). Los vórtices (singularidades de fase) no se presentan naturalmente en las distribuciones en intensidad. Sin embargo, la transformada de Laguerre Gauss permite obtener una señal analítica compleja a partir de la distribución en intensidad. Posteriormente, identificamos los vórtices ópticos presentes en los perfiles espacio-temporales y determinamos su densidad. Se emplea un filtro basado en la esfera de Poincaré para eliminar los vórtices inestables que no llevan información sobre el proceso dinámico bajo estudio. La intensidad de la turbulencia, cuantificada por la constante de estructura del índice de refracción, fue previamente caracterizada para el turbulador en función de la diferencia de temperatura ΔT entre la fuente fría y caliente del instrumento. Se verifica que los resultados obtenidos a partir de la densidad de vórtices concuerdan con la intensidad de la turbulencia obtenida previamente para el instrumento y dentro del rango estudiado.

1. Introducción

El análisis temporal de una señal de speckle dinámico proporciona información detallada sobre los movimientos microscópicos asociados al fenómeno que lo ocasiona. Existen múltiples descriptores que permiten estudiar las señales y secuencias de imágenes de speckle dinámico. En particular, se han explorado descriptores basados en contraste [1], correlación espacio-temporal [2], autocorrelación [3], matrices de co-ocurrencia [4] y descriptores de diferencias promediadas [5–8]. Asimismo, en trabajos previos se analizaron métodos alternativos para el estudio de procesos dinámicos, tales como la localización y seguimiento de los vórtices ópticos así como las medidas de la densidad de vórtices a lo largo del tiempo. [9–11]. Se empleó el descriptor de procesos dinámicos basado en la densidad de vórtices para caracterizar el ampliamente estudiado proceso de secado de pinturas.

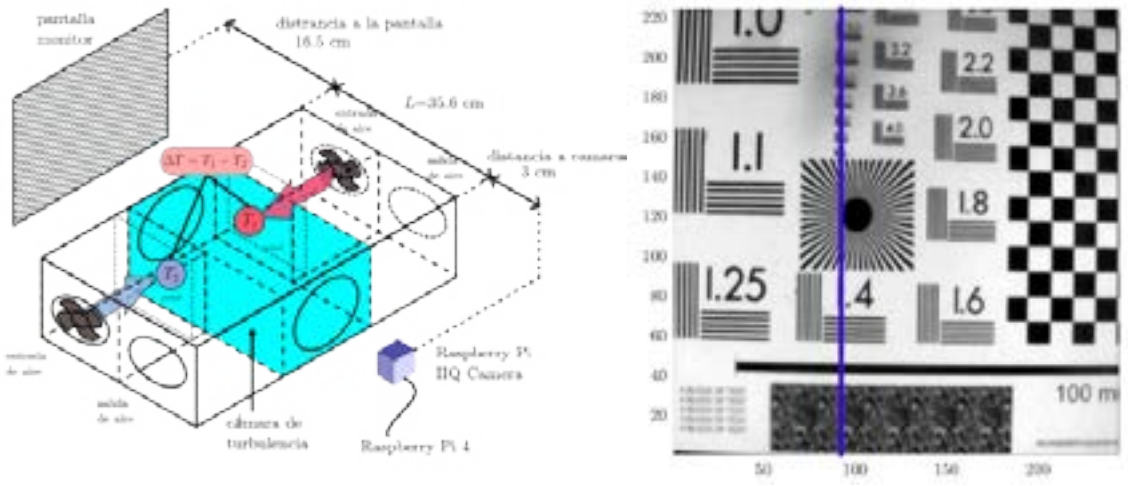
En este trabajo se presenta el uso de la densidad de vórtices como métrica cuantitativa para caracterizar la turbulencia. La turbulencia atmosférica produce fluctuaciones en las propiedades ópticas del aire, afectando la propagación de la luz y dificultando aplicaciones como comunicaciones ópticas y óptica adaptativa. Para caracterizar dicha turbulencia es habitual cuantificar la intensidad de las fluctuaciones mediante el constante de estructura del índice de refracción, C_n^2, que depende de factores termodinámicos [12–16].

En nuestra propuesta se emplea un montaje experimental con turbulencia controlada en laboratorio, y se analiza la evolución de patrones en intensidad que se propagan a través de

una región de turbulencia y cuya imagen se registra en una cámara. Se genera un diagrama espacio-temporal (DET) en intensidad a partir de la secuencia de imágenes. La transformada de Laguerre Gauss permite obtener una señal analítica compleja a partir de la DET. Los campos complejos obtenidos permiten localizar los vórtices y determinar su densidad. Dicha densidad crece linealmente con la constante de estructura del índice de refracción (C_n^2), lo que demuestra el potencial de esta aproximación para evaluar la intensidad de la turbulencia de manera no invasiva empleando dispositivos experimentales simples y de bajo costo.

2. Parte experimental

Para generar turbulencia inercial completamente desarrollada en condiciones estables y estadísticamente repetibles, empleamos una cámara de turbulencia de laboratorio (turbulador). En dicha cámara de mezcla confluyen flujos de aire a distintas temperaturas, forzados a mezclarse en una región de ~0.35 m [12–16]. En la Figura 1 a) se esquematiza el dispositivo mencionado. La luz de un patrón fijo (Figura 1 b)) generado un monitor LED estándar se propaga a través de una región ~0.35 con una turbulencia artificial y luego se enfoca la imagen del monitor en una cámara (Raspberry Pi HQ).
La intensidad de la turbulencia, cuantificada por la constante de estructura del índice de refracción (C_n^2), fue previamente caracterizada para el turbulador en función de la diferencia de temperatura ΔT entre la fuente fría y caliente del instrumento. Los experimentos se llevaron a cabo con 15 diferencias de temperatura que van desde 2.6ºC a 106.2ºC, todas con C_n^2 caracterizado Para cada intensidad de turbulencia se realizó una captura de 60 segundos a 24 fps y resolución de 640x480..



(a) (b)

Figura 1. a) Esquema del montaje experimental: monitor LED, cámara de turbulencia y cámara Raspberry Pi HQ para la adquisición de las imágenes. b) región de interés y en azul una columna genérica indicada (93).

Las imágenes se limitaron a una región de interés de 225×244 píxeles. Para cada intensidad de turbulencia se grabaron secuencias de video, y de cada cuadro se extrajeron columnas para construir los diagramas espacio-temporales (DET). De esta forma, para cada columna se genera una imagen en intensidad en la cual la coordenada horizontal corresponde al tiempo y la vertical a la posición del píxel en la columna [9].
Para asociar una fase a cada imagen de intensidad, se empleó la transformada Laguerre-Gauss (LG) [9–11]. Dicha transformada permite obtener un pseudocampo complejo en el que pueden localizarse vórtices (puntos de intensidad nula donde la fase no está definida) y determinar su densidad. La representación de los vórtices en la esfera de Poincaré [9,10] permite filtrar las singularidades o vórtices inestables originados en el ruido electrónico [17]. Cabe destacar que, en esta representación, las singularidades de fase inestables se localizan en el ecuador, lo que

facilita su filtrado. La eliminación de estos vórtices mediante el filtrado mejora los resultados obtenidos en la estimación de la intensidad de la turbulencia a partir del descriptor propuesto.

3. Resultados y discusión

Se aplicó el procedimiento descrito a cada columna de la región de interés. En cada caso se generó un DET, se hallaron las singularidades de fase correspondientes, filtrando aquellas cercanas al ecuador de la esfera de Poincaré, donde la localización se vuelve incierta [9,10]. Esto reduce la contribución de vórtices espurios.

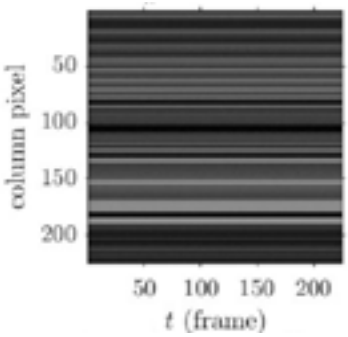
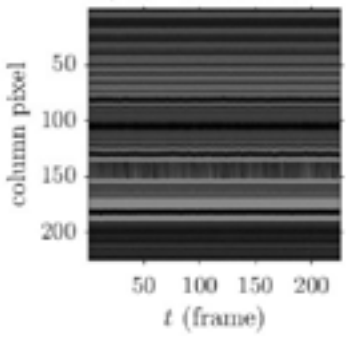
	Diagramas espacio-temporales (DET)	Vórtices ópticos
Menor turbulencia analizada Constante de estructura $C_n^2=6.14 \times 10^{-9}\ m^{-2/3}$		
Mayor turbulencia analizada Constante de estructura $C_n^2=3.77 \times 10^{-8}\ m^{-2/3}$		

Figura 2. En esta figura se incluyen los DET y los vórtices detectados (en naranja) tras aplicar el filtro basado en la esfera de Poincaré. Los resultados corresponden a la evolución temporal de la columna 93 seleccionada de la imagen original.

En cada caso se calculó la densidad de vórtices (ρ_0), definida como el número de vórtices filtrados en la imagen DET. Se repitió para diversas diferencias de temperatura, abarcando 15 valores de ΔT, lo que permitió cubrir un rango amplio de C_n^2.
Los resultados muestran una relación lineal entre la densidad de vórtices y el valor de C_n^2. En la Figura 3 se observa un ejemplo de esta relación para una columna representativa, y en la Figura 4 se muestra el promedio de ρ_0 considerando todas las columnas. El ajuste lineal logra un coeficiente de correlación elevado ($R^2 \approx 0.99$).

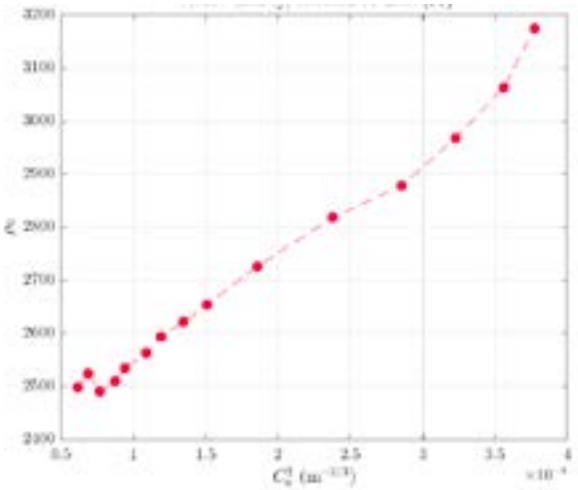
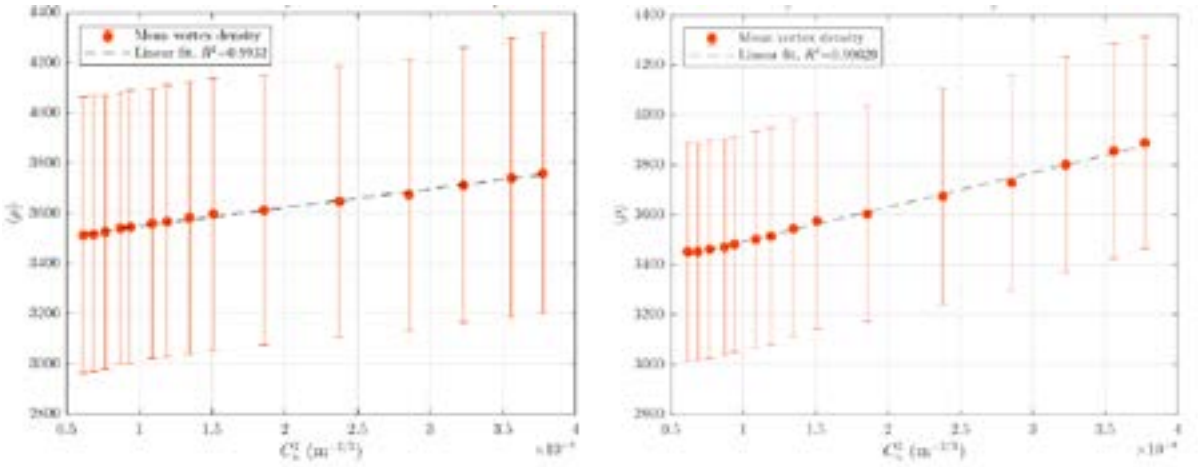


Figura 3. Densidad de vórtices frente a la intensidad de la turbulencia para la columna 93 de la imagen original, evidenciando la fuerte correlación lineal.



a) b)

Figura 4. Promedio de la densidad de vórtices en todas las columnas: la línea representa el ajuste lineal, con $R^2 \approx 0.99$. Se confirman los resultados del ejemplo individual. a) sin filtrado textural y b): con filtrado textural.

Además, se evaluó un criterio de "riqueza de textura" para descartar aquellas columnas con intensidades uniformes en las cuales la turbulencia no produce variaciones apreciables [15,16]. Esto afina el análisis y mejora la correlación lineal, permitiendo estimar con precisión la tasa de crecimiento de la densidad de vórtices en función de C_n^2.

En síntesis, la técnica de densidad de vórtices muestra ser un descriptor sensible y repetible. El uso del filtrado en la esfera de Poincaré permite eliminar singularidades inestables, y la calibración basada en el constante de estructura C_n^2 confirma la validez de la propuesta para cuantificar la turbulencia en entornos controlados.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra que la densidad de vórtices ópticos, calculada a partir de la pseudofase de imágenes afectadas por turbulencia atmosférica, presenta una correlación lineal sólida con la intensidad de turbulencia (C_n^2). El uso de filtros basados en la esfera de Poincaré elimina vórtices inestables mejorando la robustez de la métrica.

La propuesta ofrece:

- Simplicidad y repetibilidad: el método requiere únicamente imágenes del patrón transmitido a través de la turbulencia.
- Sensibilidad a las distorsiones: la densidad de vórtices refleja pequeñas fluctuaciones en la fase, vinculadas a la turbulencia.
- Flexibilidad: el enfoque es escalable a sistemas al aire libre y podría integrarse en soluciones de óptica adaptativa o comunicaciones ópticas.

Futuros trabajos abordarán la aplicación en medios turbulentos naturales y la extensión del método a distancias de propagación mayores. Asimismo, la optimización de la selección del patrón base y la exploración de filtros avanzados podrían incrementar la precisión.

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado parcialmente por:

- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I266)
- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) a través de los proyectos PICT Nº 4558 y PICT-2021-CAT-I-00074,
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), proyecto PIP Nº 11220220100080CO (Argentina)

Referencias

1. R. Arizaga, E. E. Grumel,N. Cap, M. Trivi, J. I. Amalvy, B. Yepes, G. Ricaurte Following the drying of spray paints using space and time contrast of dynamic speckle, Journal of Coatings Technology and Research 3(4), 295–299 (2006).
2. A. Zdunek, L.I. Muravsky, L. Frankevych, K. Konstankiewicz, New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life, International Agrophysics 21(3), 305–310 (2007).
3. C. A. R. Chapman, Sonny Ly, Ling Wang, Erkin Seker, M. J. Matthews2, Utilizing dynamic laser speckle to probe nanoscale morphology evolution in nanoporous gold thin films, Optics Express 24(5), 5323 (2016).
4. R. Arizaga, M. Trivi, H. Rabal, Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis, Optics & Laser Technology 31(2), 163–169 (1999).
5. H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, T. Ohura, Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. Part 1, Appl. Opt. 26(24), 5321–5325 (1987).
6. M. Z. Ansari, A. K. Nirala, Biospeckle assessment of torn plant leaf tissue and automated computation of leaf vein density (LVD), The European Physical Journal Applied Physics 70(2), 21201 (2015).
7. P. D. Minz, A. Nirala, Intensity based algorithms for biospeckle analysis, Optik 125(14), 3633–3636 (2014) .
8. R. A. Arizaga, N. L. Cap, H. J. Rabal, M. Trivi, Display of local activity using dynamical speckle patterns, Optical Engineering 41(2), 287-294 (2002).
9. A. L. V. Amado, D. Sierra-Sosa, A. Elmaghraby, E. Grumel, H. Rabal, M. Tebaldi, Poincare sphere noise filtering for singularities in dynamic speckle activity: application to paint drying time measurement, Optics and Lasers in Engineering 136, 106317 (2021).
10. W. Wang, T. Yokozeki, R. Ishijima, M. Takeda, S. G. Hanson, Optical vortex metrology based on the core structures of phase singularities in Laguerre-Gauss transform of a speckle pattern, Optics Express 14(22), 10195 (2006).
11. D. Sierra-Sosa, M Isaza-Monsalve, L Angel-Toro, M Tebaldi, Dynamic tracking with simultaneous edge enhancement, Optik 149 155–161 (2017).
12. Onur Keskin, Laurent Jolissaint, Colin Bradley, Hot-air optical turbulence generator for the testing of adaptive optics systems: principles and characterization, Applied Optics 45(20) 4888- 4897 (2006).

13. A. Fuchs, J. Vernin, M. Tallon, Laboratory simulation of a turbulent layer: optical and *in situ* characterization, Applied Optics 35(10) 1751- 1755(1996).
14. E. Masciadri, J. Vernin, Optical technique for inner-scale measurement: possible astronomical applications, Applied Optics 36(6) 1320-1327 (1997) .
15. D. Gulich, G. Funes, D. Pérez, L. Zunino, Estimation of Cn2 based on scintillation of fixed targets imaged through atmospheric turbulence, Opt. Lett. 40(23) (2015) 5642–5645.
16. D. Gulich, Temporal correlations imaging fixed targets through turbulence,Opt. Lett. 41(12) (2016) 2855–2858.
17. A. Villamizar Amado, N. L. Cap, S. Gallo, H. Rabal, M. Tebaldi, Unstable phase singularities in noise contaminated images, Proceedings Volume 11510, Applications of Digital Image Processing XLIII; 115102V (2020).

EL LEGADO DE ASIMOV EN IA: RESPONSABILIDAD ÉTICA EN LA ERA DE LOS VEHÍCULOS Y AGENTES AUTÓNOMOS

Gulich, Damián

Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata - CIC-UNLP), Camino Centenario y 506, Gonnet (La Plata), CP 1897, Buenos Aires, Argentina
Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), calle 1 y 47, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina
maximiliano.gulich@ing.unlp.edu.ar

Resumen

En este artículo exploramos la ética de las máquinas a través de las Tres Leyes de la Robótica de Isaac Asimov y su aplicación a los agentes autónomos modernos, en particular los vehículos. Examinamos las fortalezas y limitaciones de los marcos éticos deontológicos y utilitaristas para la IA, señalando desafíos como la rigidez de las reglas y las complejidades de maximizar el bienestar colectivo. Las preocupaciones éticas clave incluyen la rendición de cuentas y la necesidad de algoritmos de toma de decisiones adaptativos. Concluimos que, si bien el marco de Asimov ofrece perspectivas fundamentales, las aplicaciones del mundo real requieren modelos éticos más flexibles y sensibles al contexto, lo que subraya la importancia de los enfoques estandarizados e interdisciplinarios para la ética de la IA.

Introducción

El rápido desarrollo de la inteligencia artificial (IA) y de sistemas autónomos ha transformado escenarios antes propios de la ciencia ficción en realidades cotidianas. Actualmente, vehículos capaces de conducirse solos y robots de asistencia operan de forma cada vez más independiente, asumiendo decisiones con implicaciones éticas considerables para la seguridad humana.

Isaac Asimov, en la década de 1940, ya anticipaba muchos de estos dilemas en sus relatos de ficción, estableciendo las hoy célebres *Tres Leyes de la Robótica* [1]. La visión de Asimov buscaba garantizar la seguridad y el bienestar de los seres humanos cuando los robots llegaran a tener suficiente autonomía como para actuar sin guía humana. Aunque estas leyes provienen de la literatura de ciencia ficción, abrieron el debate sobre cómo se deberían diseñar y supervisar las máquinas inteligentes. En la actualidad, las preguntas sobre responsabilidad, transparencia y salvaguarda de valores humanos son cruciales en áreas como el transporte, la atención médica y la toma de decisiones automatizadas.

La investigación actual en ética de máquinas (“machine ethics”) ve estos sistemas como construcciones socio-técnicas, donde el diálogo entre tecnología y sociedad determina su evolución. A medida que la autonomía de estos agentes se expande, aumenta la urgencia de desarrollar estructuras éticas robustas que consideren la complejidad de los entornos reales y los valores sociales imperantes.

1.1. Agentes autónomos y ética

Asimov presentó sus “Tres Leyes de la Robótica” en el cuento Runaround [1, 2], formulando un conjunto de reglas de naturaleza deontológica (reglas que no cambian en el tiempo):

1. Un robot no hará daño a un ser humano, ni por inacción permitirá que un ser humano sufra daño.

2. Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estas órdenes entren en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Omitimos en esta contribución la Ley Cero, ya que merece un análisis detallado aparte. Estas leyes, aunque ideadas para un contexto ficticio, se han interpretado como inspiración para la regulación de máquinas autónomas, incluidos los vehículos [3]. En la práctica, un automóvil autónomo enfrenta el reto de equilibrar órdenes humanas y salvaguardar vidas: debe priorizar la seguridad de sus pasajeros y peatones, al tiempo que sigue las normas de tráfico. No obstante, las decisiones críticas, como elegir entre dos riesgos diferentes, son complejas y no pueden resolverse solamente con reglas inamovibles.

Aquí surge el concepto de 'machine ethics': la responsabilidad recae tanto en la máquina como en sus diseñadores. Mientras el sistema se comporta de forma "éticamente activa" en el momento de la acción, la programación de esos principios éticos proviene de ingenieros y programadores que, en muchos casos, no estarán presentes cuando surjan las situaciones críticas [11, 12, 13, 14, 15].

Además de la perspectiva deontológica, algunos autores proponen la utilidad colectiva como criterio moral para la toma de decisiones (enfoque utilitarista) [4]. Sin embargo, ambos enfoques—deontológico y utilitarista—presentan limitaciones cuando se ponen en práctica en entornos reales, dada la complejidad y variabilidad de las circunstancias.

1.2. Limitaciones

Tanto el deontologismo como el utilitarismo enfrentan obstáculos que dificultan su implementación en sistemas autónomos:

Limitaciones del utilitarismo: Definir una función de utilidad que cuantifique el "bienestar colectivo" no es trivial. Un vehículo autónomo podría decidir impactar a un motociclista con casco antes que a uno sin casco, considerando que el primero tendría mayor probabilidad de sobrevivir. Esta "lógica estadística" plantea cuestiones éticas profundas sobre la equidad y el derecho individual.

Limitaciones del deontologismo: Una máquina que aplique normas inquebrantables puede toparse con el "problema del sentido común" [16, 17]. En un ejemplo simple, un coche autónomo estrictamente apegado a las reglas de tráfico podría verse incapaz de esquivar un obstáculo menor invadiendo el carril contrario, aun cuando no hubiese riesgo de accidente. La rigidez normativa llevaría a situaciones absurdas o peligrosas ante circunstancias imprevistas.

Estas debilidades destacan la necesidad de enfoques más adaptables y con mayor comprensión del contexto [18, 19]. Aun con los enormes avances en IA, los entornos humanos exigen una flexibilidad moral que ni los sistemas deontológicos ni los meramente utilitaristas logran capturar por completo [20].

2. Problemas abiertos

A medida que la adopción de sistemas autónomos se extiende a campos como el transporte, la salud y la seguridad, surgen cuestiones éticas que permanecen sin resolver:

- Responsabilidad y rendición de cuentas: En la ficción de Asimov, la responsabilidad última recaía en el fabricante. En la realidad, el proceso de desarrollo de un sistema autónomo implica a muchos actores: programadores, fabricantes, usuarios y agencias reguladoras [21], para complicar aún más las cosas. no necesariamente todos

pertenecientes a la misma organización. Cuando un vehículo autónomo toma una decisión extrema—por ejemplo, frenar de golpe para proteger a un peatón y así causar una lesión al pasajero—¿quién es el responsable legal y ético?

- Diseño de algoritmos de toma de decisiones éticas: Los sistemas actuales no son plenamente capaces de interpretar matices contextuales. Un esquema utilitarista puede reforzar resultados injustos, y uno puramente deontológico puede paralizarse ante situaciones extraordinarias [3]. Lograr que las máquinas entiendan las implicaciones profundas de la equidad o el bien común sigue siendo un desafío técnico y filosófico.
- Sesgos en los datos: Los algoritmos aprenden de datos históricos, que pueden incluir sesgos de género, raza o clase social [22]. Si estos sesgos no se detectan y corrigen, se perpetuarán decisiones discriminatorias en ámbitos como la seguridad vial o la justicia criminal. La transparencia y auditabilidad de las decisiones de IA es esencial para mitigar estos riesgos.
- Falta de estándares globales: Aunque existen iniciativas que proponen lineamientos, no hay un consenso universalmente aceptado para regular la ética en IA [23]. La ausencia de criterios compartidos a escala internacional dificulta la uniformidad en la protección de los derechos y la seguridad de las personas.

La magnitud de estos problemas exige un trabajo transdisciplinario. Ingenieros, juristas, filósofos y sociólogos deben colaborar para definir principios que guíen el diseño y la validación de sistemas autónomos. De este modo, se podrá alinear la innovación tecnológica con valores sociales y éticos más amplios.

Conclusiones

Las reflexiones de Asimov sobre la ética de los robots apuntaban a una integración temprana de principios de seguridad y bienestar humano en máquinas altamente autónomas. Sin embargo, llevar estas ideas a la práctica revela que sus “Tres Leyes” resultan insuficientes ante la complejidad del mundo real. Ni el deontologismo ni el utilitarismo, por sí solos, pueden abarcar la variedad de circunstancias y conflictos que pueden surgir cuando los agentes deben actuar sin supervisión inmediata de un ser humano.

La creciente autonomía de los vehículos y agentes de IA subraya la urgencia de contar con regulaciones y protocolos éticos que vayan más allá de simples reglas fijas. Se requiere un enfoque mixto y contextual, capaz de equilibrar la protección de los derechos individuales con la búsqueda del bien colectivo. Además, el tema de la responsabilidad no puede recaer en un solo actor, dado que el ciclo de vida de un sistema autónomo involucra a numerosos participantes, desde el desarrollo hasta su uso cotidiano [24, 25, 26].

En definitiva, Asimov sentó las bases de una discusión que continúa evolucionando y que hoy resulta crítica para la aceptación social y la seguridad de los sistemas autónomos. Lograr un marco ético sólido y flexible depende de la voluntad coordinada de la industria, la academia y los organismos reguladores. Solo así podremos alinear estas tecnologías con valores que prioricen la vida y la dignidad humana, a la vez que impulsen innovaciones útiles y responsables.

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado parcialmente por:

- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I266)
- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) a través de los proyectos PICT Nº 4558 y PICT-2021-CAT-I-00074,
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), proyecto PIP Nº 11220220100080CO (Argentina)

Bibliografía

1. Isaac Asimov. Runaround. Astounding Science Fiction, 29(1):94–103, mar 1942.
2. Michael Anderson and Susan Leigh Anderson. Robot be good. Scientific American, 303(4):72–77, 2010.
3. Noah J. Goodall. Machine ethics and automated vehicles. In Road Vehicle Automation, pages 93–102. Springer International Publishing, 2014.
4. Noah Goodall. Ethical decision making during automated vehicle crashes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2424:58–65, dec 2014.
5. Mario Augusto Bunge. Philosophical Dictionary. Prometheus Books, Amherst, NY, jan 2003.
6. Isaac Asimov. The Complete Robot. HarperCollins, London, England, may 2018.
7. Isaac Asimov. Asimov on Science Fiction. Doubleday Books, jan 1981.
8. Lee McCauley. The frankenstein complex and asimov's three laws. University of Memphis, 2007.
9. Gorman Beauchamp. The Frankenstein Complex and Asimov's Robots. Mosaic: A Journal for the Interdisciplinary Study of Literature, 13(3/4):83–94, 1980.
10. Robin Murphy and David D. Woods. Beyond asimov: The three laws of responsible robotics. IEEE Intelligent Systems, 24(4):14–20, jul 2009.
11. C. Allen, W. Wallach, and I. Smit. Why machine ethics? IEEE Intelligent Systems, 21(4):12–17, jul 2006.
12. R. Clarke. Asimov's laws of robotics: implications for information technology-part I. Computer, 26(12):53–61, 1993.
13. Roger Clarke. Asimov's laws of robotics: Implications for information technology. 2. Computer, 27(1):57–66, 1994.
14. Susan Leigh Anderson. Asimov's three laws of robotics and machine metaethics. AI & SOCIETY, 22(4):477–493, mar 2007.
15. Michael Anderson and Susan Leigh Anderson. Machine ethics: Creating an ethical intelligent agent. AI Magazine, 28(4):15, 2007.
16. Patrick Lin. The ethics of autonomous cars. Online, oct 2013. [Accessed 10-11-2024].
17. Ronald C. Arkin. Governing lethal behavior. In Proceedings of the 3rd international conference on Human robot interaction - HRI '08. ACM Press, 2008.
18. Michael Anderson and Susan Leigh Anderson, editors. Machine Ethics. Cambridge University Press, Cambridge, England, jun 2011.
19. Brian Hutler, Travis N. Rieder, Debra J. H. Mathews, David A. Handelman, and Ariel M. Greenberg. Designing robots that do no harm: understanding the challenges of ethics for robots. AI and Ethics, 4(2):463–471, April 2023.
20. J.H. Moor. The nature, importance, and difficulty of machine ethics. IEEE Intelligent Systems, 21(4):18–21, jul 2006.
21. Andreas Matthias. The responsibility gap: Ascribing responsibility for the actions of learning automata. Ethics and Information Technology, 6(3):175–183, 2004.
22. Cathy O'Neil. Weapons of math destruction. Broadway Books, sep 2017.
23. IEEE. Ethically aligned design - a vision for prioritizing human well-being with autonomous and intelligent systems. 2019.
24. Patrick Lin, Keith Abney, and Ryan Jenkins, editors. Robot ethics 2.0. Oxford University Press, New York, NY, sep 2017.
25. Luciano Floridi. The ethics of information. Oxford University Press, London, England, oct 2013.
26. Deborah G. Johnson. Algorithmic accountability in the making. Social Philosophy and Policy, 38(2):111–127, 2021.

CUANTIFICACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA CON DEEP LEARNING EN EL DOMINIO ESPACIO-TEMPORAL

Gulich, Damián[1,2,], Sierra-Sosa, Daniel[3], Tebaldi, Myrian[1,2]

(1) Centro de Investigaciones Opticas (CONICET La Plata - CIC-UNLP), Camino Centenario y 506, Gonnet (La Plata), CP 1897, Buenos Aires, Argentina
(2) Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), calle 1 y 47, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina
(3) Electrical Engineering and Computer Science, The Catholic University of America, Washington, DC 20064, USA
maximiliano.gulich@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La cuantificación de la intensidad de la turbulencia atmosférica es una tarea complicada, en particular cuando se evalúan escenarios del mundo real. Proponemos un método de aprendizaje profundo (deep learning) para cuantificar la intensidad de la turbulencia atmosférica con base en el análisis del dominio espacio-temporal de videos que muestran diferentes niveles de turbulencia. Capturamos videos de una imagen estática que atraviesa regiones con intensidades de turbulencia de aire controladas, generadas empleando una cámara de bajo costo. Posteriormente, a partir de estos videos en el dominio espacio temporal se generaron nuevas imágenes de historias temporales, que son representaciones enriquecidas de la dinámica de la turbulencia. Estas representaciones luego se introducen en una red neuronal convolucional para su clasificación. Esta red aprende de manera efectiva a discriminar entre diferentes regímenes de turbulencia en función de las características espacio-temporales extraídas de los cortes de video.

1. Introducción

La turbulencia atmosférica, caracterizada por fluctuaciones de temperatura y presión, afecta de manera significativa la propagación de ondas electromagnéticas, provocando variaciones en el índice de refracción del aire y degradando el frente de onda [1]. Esto influye en el desempeño de numerosos sistemas de comunicación e imágenes, incluyendo telescopios terrestres y enlaces de comunicación óptica a distintas longitudes de onda [1,2].

Para cuantificar la intensidad de la turbulencia atmosférica, se suele utilizar la constante de estructura del índice de refracción, C_n^2, que proporciona un indicador de la magnitud de la turbulencia [1]. Históricamente, se han utilizado diversos métodos: (a) centellómetros, (b) anemómetros sónicos, (c) mediciones de ángulo de arribo, (d) sensores Shack–Hartmann, y (e) métodos diferenciales [1,5,9]. Sin embargo, estos métodos pueden presentar limitaciones en costo o complejidad de implementación. Por ello, existen esfuerzos en desarrollar aproximaciones más accesibles y con menor dependencia de equipamiento especializado [6–8].

En los últimos años, el análisis de la turbulencia a partir de secuencias de vídeo y el uso de aprendizaje profundo (Deep Learning) han demostrado ser herramientas prometedoras para caracterizar y mitigar los efectos de turbulencia [11–17]. En particular, las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) permiten extraer rasgos complejos de datos espaciales y temporales [17–19]. En este trabajo, proponemos una estrategia para cuantificar la intensidad de turbulencia atmosférica mediante la clasificación de rebanadas espacio-temporales extraídas de vídeos, entrenando una CNN para discriminar diferentes intensidades de turbulencia.

El montaje experimental se llevó a cabo con un *turbulador* en laboratorio, que genera turbulencia estable y controlada mediante dos flujos de aire a diferentes temperaturas [27,28]. El índice C_n^2 se asocia a cada condición térmica (diferencia de temperatura, ΔT) [29,30], pudiendo así contar con valores bien caracterizados para el entrenamiento y prueba del

modelo. Luego, se grabaron secuencias de vídeo de un patrón estático que atravesaba dicha turbulencia. De dichas secuencias se extrajeron volúmenes espacio-temporales para alimentar la CNN y clasificar de manera automática la turbulencia en categorías discretas de C_n^2.
Esta contribución describe la metodología y resultados de la cuantificación de turbulencia, su discusión, así como conclusiones respecto a la aplicabilidad de la técnica y futuras líneas de investigación.

2. Parte experimental

2.1 Configuración del experimento

Se diseñó un arreglo experimental (ver Figura 1) con un monitor que mostraba una imagen estática, un turbulador en el que el haz de luz atravesaba ~0.35 m de flujo turbulento, y una cámara Raspberry Pi HQ para adquirir las imágenes. La cámara se ubicó a 3 cm de la ventana de salida del turbulador. La turbulencia en el dispositivo se produce mezclando dos flujos de aire a temperaturas distintas, lo que otorga valores de C_n^2 medibles en función de ΔT [28,31–33].

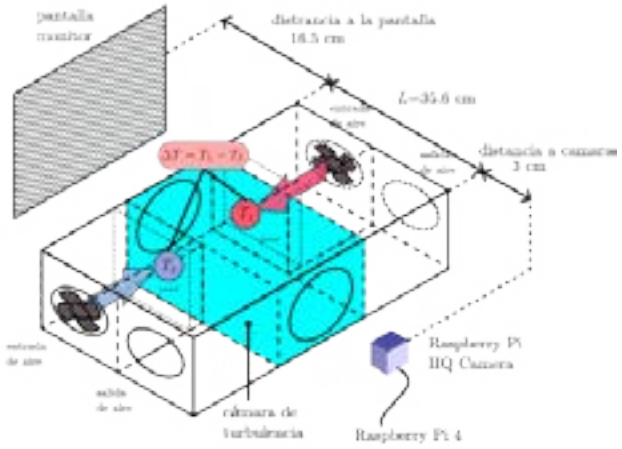


Figura 1. Esquema del montaje experimental: el tablero fijo se coloca a un lado de la cámara, atravesando el aire turbulento dentro del turbulador.

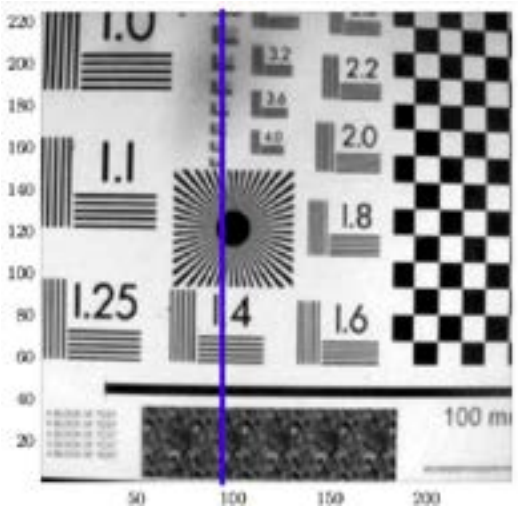


Figura 2. Región de interés (ROI) empleada para el análisis. En azul, la columna de interés.

Se analizaron 15 valores de ΔT entre 2.6 °C y 106.2 °C, con valores caracterizados de C_n^2 desde aproximadamente 0.6×10^{-8} $m^{-2/3}$ hasta 3.8×10^{-8} $m^{-2/3}$. Para cada condición de turbulencia se grabó un vídeo de 56 s, a 24 fps con resolución 640×480 en formato YUV sin compresión. Se seleccionó una región de interés (ROI) de 225×244 píxeles (Figure 2).

Con el fin de capturar la dinámica temporal de la turbulencia, se extrajeron rebanadas espacio-temporales tomando columnas de dicha ROI a lo largo de 225 cuadros (~9 s). Esto generó

conjuntos de imágenes 225×225, donde el eje vertical corresponde a la dimensión espacial de la columna y el eje horizontal corresponde al tiempo (Figure 3). Cada intensidad de turbulencia generó ~1220 imágenes, totalizando 18300 para el entrenamiento y validación.

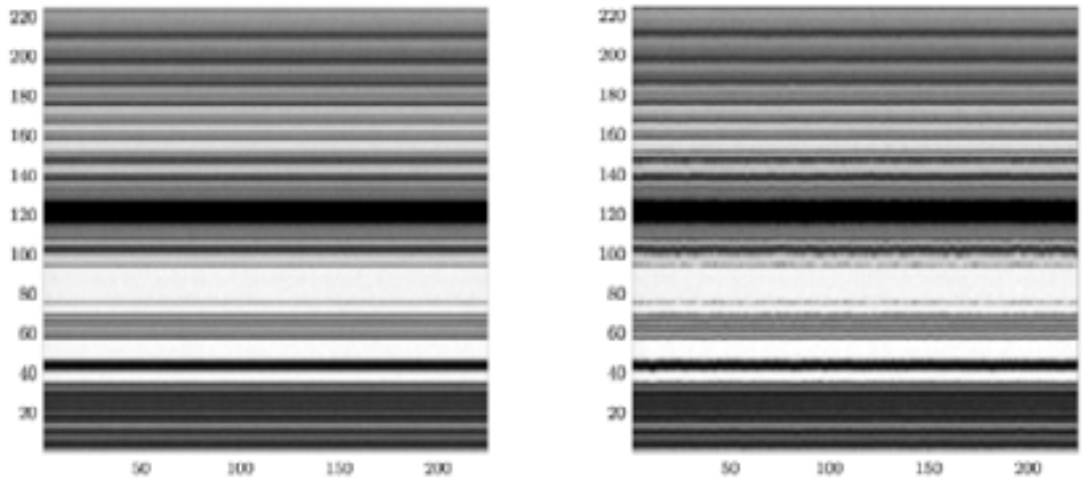


Figura 3. Ejemplo de evolución temporal de una columna seleccionada dentro de la ROI para diferentes intensidades de turbulencia. a) menor turbulencia empleada correspondiente a C_n^2=*6.1396 x* 10^{-9} $m^{-2/3}$; b) con la máxima turbulencia empleada correspondiente a C_n^2=*3.7728 x* 10^{-8} $m^{-2/3}$.

3. Resultados y discusión

3.1 Modelo de aprendizaje profundo

Para la clasificación de la turbulencia, se utilizó una Red Neuronal Convolucional (CNN) con tres capas convolucionales (filtros de 3×3 y stride 2), seguidas por capas densas con 128 neuronas y una capa de salida softmax con 15 categorías (etiquetas). El entrenamiento se realizó en Keras [35], empleando el optimizador Adam y función de pérdida de entropía cruzada categórica (Figura 4). Las métricas de evaluación incluyeron exactitud (accuracy), loss y F1-score [36,37]. También se calculó la matriz de confusión (Figura 5).

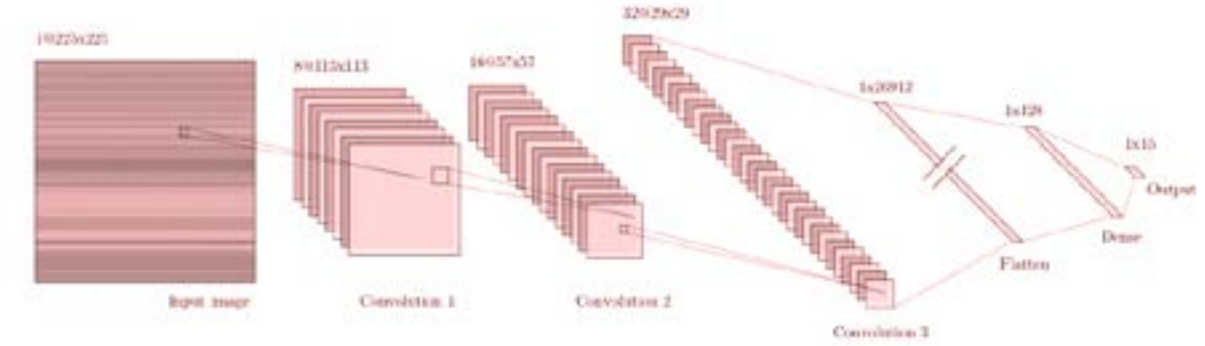


Figura 4. Arquitectura de la red neuronal convolucional (CNN) propuesta para la clasificación de la turbulencia.

El conjunto de datos se dividió en 80% para entrenamiento (con 10% de validación interna) y 20% para prueba, asegurando así la evaluación en datos no vistos. Durante el entrenamiento, se observó una convergencia estable de la red, con una exactitud final cercana a 80% en el conjunto de prueba para todas las categorías, superando 90% de acierto en turbulencias con

$C_n^2 \geq 1.5\times10^{-8}$ $m^{-2/3}$ (Figura 6) . En casos de turbulencia muy baja, los rasgos espacio-temporales se vuelven sutiles, lo que explica la ligera disminución de exactitud.

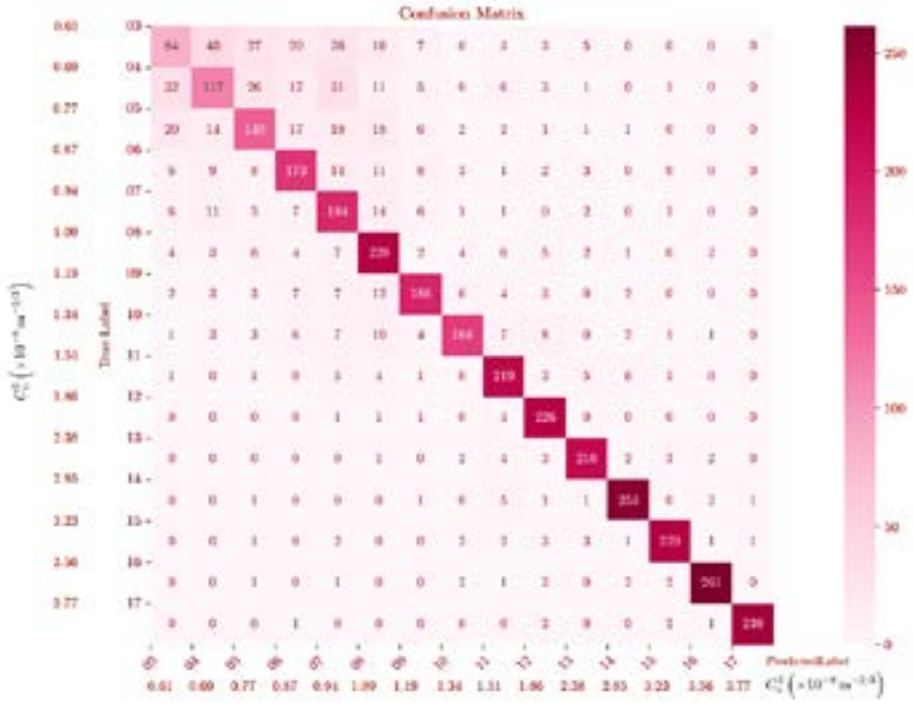


Figura 5. Matriz de confusión.

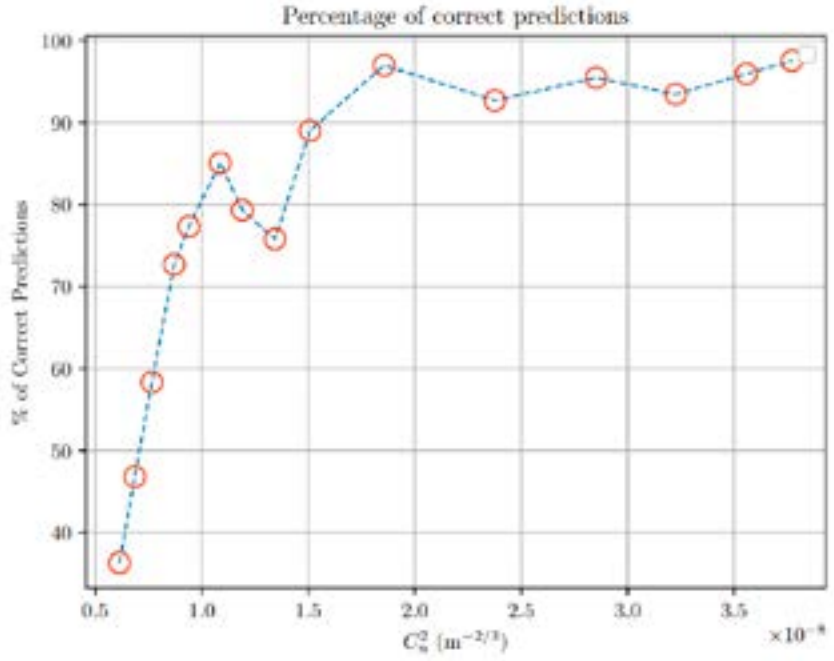


Figura 6. Porcentaje de predicciones correctas en función de la intensidad de la turbulencia empleada.

3.2 Análisis de resultados

La matriz de confusión (Figura 5) mostró un buen desempeño en la identificación de intensidades medias y altas de turbulencia, que generan patrones más distintivos en el

espacio-tiempo. Para aplicaciones prácticas, donde la turbulencia puede ser significativa —por ejemplo, en comunicaciones ópticas o imágenes astronómicas—, este método ofrece resultados confiables con equipamiento de bajo costo y un procesamiento de vídeo de pocos segundos (~9 s).

Dada la relativa homogeneidad en el turbulador, el modelo asume una sola capa de turbulencia. Sin embargo, en escenarios reales (trayectorias más largas o distribuciones de turbulencia más complejas), será necesario considerar perfiles de turbulencia en múltiples capas [1]. Aun así, el enfoque basado en aprendizaje profundo se puede extender entrenando la CNN con datos relevantes para cada perfil (ya sean simulados o provenientes de experimentos o mediciones de campo).

El modelo probado, de arquitectura ligera (~41 MB), se presta para implementaciones rápidas de inferencia, lo que posibilita un monitoreo en tiempo cuasi real de la turbulencia. Además, al no depender de mediciones ópticas específicas (como sensores Shack–Hartmann o anemómetros sónicos), ni de un modelo analítico estricto de la turbulencia, la propuesta resulta flexible para diversos escenarios.

4. Conclusiones

Se presentó un método para cuantificar la turbulencia atmosférica mediante la clasificación de rebanadas espacio-temporales de vídeo con una CNN. El experimento de laboratorio empleó un turbulador controlado con valores conocidos de C_n^2, lo que sirvió para entrenar y validar el modelo de aprendizaje profundo. Los resultados muestran una exactitud mayor al 90% para turbulencias moderadas a altas y aceptable desempeño (~80%) en turbulencias bajas.

La aproximación aprovecha sensores y procesadores de bajo costo, extrayendo rasgos espacio-temporales que permiten caracterizar la turbulencia sin instrumentación especializada. Con suficientes datos de entrenamiento, esta estrategia puede escalarse a escenarios reales, incluyendo comunicaciones ópticas en espacio libre y aplicaciones astronómicas. Futuros trabajos contemplarán (a) la optimización para turbulencia muy baja, (b) la incorporación de información de color, (c) la extensión a escenarios de turbulencia no uniforme y (d) la evaluación del tiempo mínimo de captura para lograr clasificaciones fiables.

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado parcialmente por: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I266); ANPCyT a través de los proyectos PICT Nº 4558 y PICT-2021-CAT-I-00074, CONICET a través proyecto PIP Nº11220220100080CO (Argentina) y School of Engineering de The Catholic University of America (Estados Unidos).

Referencias

1. L.C. Andrews, M.K. Beason, Laser Beam Propagation in Random Media; Press Monographs; SPIE Press: Bellingham, WA, USA (2023).
2. F. V. Roddier, The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy; Progress in Optics; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1981; Vol. 19, pp. 281–376.
3. L.C. Andrews, Field Guide to Atmospheric Optics, 2nd ed.; SPIE: Bellingham, WA, USA (2019).
4. A. Abahamid, A. Jabiri, J. Vernin, Z.Benkhaldoun, M. Azouit, A. Agabi, Optical turbulence modeling in the boundary layer and free atmosphere using instrumented meteorological balloons. Astron. Astrophys. 416, 1193–1200 (2004).
5. L. Yatcheva, R. Barros, M. Segel, D. Sprung, E. Sucher, C. Eisele, S. Gladysz, Ultimate turbulence experiment: Simultaneous measurements of C_n^2 near the ground using six devices and eight methods. Proc. SPIE 9641 (2015).

6. S. Rasouli, M.T. Tavassoly, Measurement of the refractive-index structure constant, C_n^2, and its profile in the ground level atmosphere by moire technique. Proc. SPIE 5981 (2006).
7. D. Gulich, G. Funes, D. Pérez, L. Zunino, Estimation of C_n^2 based on scintillation of fixed targets imaged through atmospheric turbulence. Opt. Lett. , 40, 5642–5645 (2015).
8. D. Gulich, Temporal correlations imaging fixed targets through turbulence. Opt. Lett. 41, 2855–2858 (2016).
9. D.G. Pérez, L. Zunino, D. Gulich, G. Funes, M. Garavaglia, Turbulence characterization by studying laser beam wandering in a differential tracking motion setup. Proc. SPIE 7476 (2009).
10. A.L.V. Amado, D. Sierra-Sosa, A. Elmaghraby, E. Grumel, H. Rabal, M. Tebaldi, Poincare sphere noise filtering for singularities in dynamic speckle activity: Application to paint drying time measurement. Opt. Lasers Eng., 136, 106317 (2021).
11. C. Jellen, J. Burkhardt, C. Brownell, C. Nelson, Machine learning informed predictor importance measures of environmental parameters in maritime optical turbulence. Appl. Opt. 59, 6379 (2020).
12. A. Corbetta, V. Menkovski, R. Benzi, F. Toschi, Deep learning velocity signals allow quantifying turbulence intensity. Sci. Adv. , 7, eaba7281 (2021).
13. Y. Chen, Research on turbulence intensity classification based on transfer learning. Optik , 242, 166867 (2021).
14. R.K. Saha, E. Salcin, J. Kim, J. Smith, S. Jayasuriya, Turbulence strength C_n^2 estimation from video using physics-based deep learning. Opt. Express , 30, 40854–40870 (2022).
15. Y .Lee, S.H. Kim, Y.J.Noh, J.H. Kim, Deep learning–based summertime turbulence intensity estimation using satellite observations. J. Atmos. Ocean. Technol. , 40, 1433–1448 (2023).
16. E. Vera, F. Guzmán, C. Weinberger, Boosting the deep learning wavefront sensor for real-time applications [Invited]. Appl. Opt. 2021, 60, B119.
17. Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton, Deep Learning. Nature , 521, 436–444 (2015).
18. P. Hill, N. Anantrasirichai, A. Achim, D. Bull, Deep learning techniques for atmospheric turbulence removal: A review. Artif. Intell. Rev. , 58, 101 (2025).
19. D. Jin, Y. Chen, Y. Lu, J. Chen, P. Wang, Z. Liu, S. Guo, X. Bai, Neutralizing the impact of atmospheric turbulence on complex scene imaging via deep learning. Nat. Mach. Intell., 3, 876–884 (2021).
20. R.P.J. Nieuwenhuizen, K. Schutte, Deep learning for software-based turbulence mitigation in long-range imaging. Proc. SPIE , 11169 (2019).
21. S.N. Rai, C.V. Jawahar, Removing Atmospheric Turbulence via Deep Adversarial Learning. IEEE Trans. Image Process. , 31, 2633–2646 (2022).
22. J. Delpiano, G.L Funes, J.E. Cisternas, S. Galaz, J.A. Anguita, Deep learning for image-based classification of OAM modes in laser beams propagating through convective turbulence. Proc. SPIE , 11167 (2019).
23. D.A. LeMaster, S. Leung, O.L. Mendoza-Schrock, Joint object classification and turbulence strength estimation using convolutional neural networks. Appl. Opt. 60, G40 (2021).
24. S. Gao, X. Liu, Y. Chen, J. Jiang, Y. Liu, Y. Jiang, Atmospheric Turbulence Strength Estimation Using Convolution Neural Network. IEEE Photonics J. 15, 1–7(2023).
25. Y. Chen, X. Liu, J. Jiang, S. Gao, Y. Liu, Y. Jiang, Estimation of ocean turbulence intensity using convolutional neural networks. Front. Phys. 11, 1279476 (2023).
26. G. Funes, D. Gulich, L. Zunino, D.G. Pérez, M. Garavaglia, Behavior of the laser beam wandering variance with the turbulent path length. Opt. Commun. 272, 476–479 (2007).
27. A. Fuchs, M. Tallon, J. Vernin, Laboratory simulation of a turbulent layer: Optical and in situ characterization. Appl. Opt. 35, 1751 (1996).

28. O. Keskin, L. Jolissaint, C. Bradley, Hot-air optical turbulence generator for the testing of adaptive optics systems: Principles and characterization. Appl. Opt. 45, 4888 (2006).
29. E. Masciadri, J. Vernin, Optical technique for inner-scale measurement: Possible astronomical applications. Appl. Opt. 36, 1320 (1997).
30. L. Zunino, D. Gulich, G. Funes, D.G. Pérez, Turbulence-induced persistence in laser beam wandering. Opt. Lett. , 40, 3145 (2015).
31. O. Keskin, L. Jolissaint, C. Bradley, S. Dost, I. Sharf, Hot-air turbulence generator for multiconjugate adaptive optics. Proc. SPIE , 5162, 49 (2003).
32. L. Jolissaint, Optical Turbulence Generators for Testing Astronomical Adaptive Optics Systems: A Review and Designer Guide. Publ. Astron. Soc. Pac. 118, 1205–1224 (2006).
33. L. Jolissaint, O. Keskin, C. Bradley, B. Wallace, A. Hilton, Multiple-layer optical turbulence generator principle and SLODAR characterization: Preliminary results. Proc. SPIE , 5572, 256 (2004).
34. L. Jolissaint, Optique Adaptative au Foyer d'un Télescope de la Classe 1 Mètre. Ph.D. Thesis, Université de Genève (2000).
35. Chollet, F. Keras. 2015. Available online: https://keras.io (accessed on 25 February 2025).
36. I. Zafar, G. Tzanidou, R. Burton, N. Patel, L. Araujo, Hands-On Convolutional Neural Networks with TensorFlow; Packt Publishing: Birmingham, UK (2018).
37. C.M. Bishop, N.M. Nasrabadi, Pattern Recognition and Machine Learning, 1st ed.; Information Science and Statistics; Springer: New York, NY, USA (2006).

NANOPARTÍCULAS TRIANGULARES EMBEBIDAS EN ESTRUCTURAS FABRICADAS MEDIANTE MICROLITOGRAFÍA UV

Gulich Damián, Medina, Ingrid, Mendoza,Luis J., Mojica, Ruth D., Tebaldi, Myrian

Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata - CIC-UNLP), Camino Centenario y 506, Gonnet (La Plata), CP 1897, Buenos Aires, Argentina
Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), calle 1 y 47, La Plata, CP 1900, Buenos Aires, Argentina
maximiliano.gulich@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Presentamos un sistema simple de fotolitografía por proyección UV para fabricar estructuras a escala microscópica utilizando una resina fotosensible con nanopartículas de plata triangulares incorporadas. Este sistema permite la creación de patrones precisos a escala microscópica, aprovechando las propiedades fotoquímicas mejoradas de la resina dopada con nanopartículas. El proceso ofrece potencial para la producción de microestructuras de alta resolución y de bajo costo, con aplicaciones en fotónica, sensores y microelectrónica.

1. Introducción

La fotolitografía UV es una técnica ampliamente utilizada en microfabricación que permite la creación precisa de patrones a microescala mediante la proyección de luz UV a través de una máscara sobre un material fotosensible. Este proceso es esencial para aplicaciones en electrónica, fotónica y sensores, donde un patrón de alta resolución resulta crucial para el rendimiento de los dispositivos.

En este estudio, desarrollamos un método sencillo para crear microestructuras de alta resolución utilizando resinas dopadas con nanopartículas, lo que posibilita la generación de microestructuras permanentes con las nanopartículas fijadas en su lugar. Estas estructuras embebidas conservan las propiedades fotoquímicas únicas de las nanopartículas de plata, lo cual abre posibilidades para su interacción con líquidos en entornos microfluídicos, la fabricación de componentes electro-ópticos y aplicaciones en sensores, fotónica y sistemas avanzados de materiales.

1.1 Objetivos de la investigación

1. Desarrollar un proceso de fotolitografía UV que integre nanopartículas triangulares.
2. Investigar el impacto de estas nanopartículas en la resolución y precisión de estructuras a microescala.
3. Explorar posibles aplicaciones en fotónica, sensores y microelectrónica.

2. Parte experimental

2.1 Materiales

- Resina fotosensible: Se seleccionó una resina UV (405 nm) comercialmente disponible y transparente como base para la fabricación de las microestructuras.
- Nanopartículas de plata triangulares: Se incorporaron nanopartículas de plata triangulares en la resina.

2.2 Proceso

1. Preparación de la resina y dispersión de las nanopartículas. Las nanopartículas de plata triangulares se disolvieron en alcohol isopropílico y se dispersaron en la resina para lograr una distribución uniforme.
2. Aplicación de la resina modificada. Se deposita una gota de la resina con nanopartículas sobre un portaobjetos de microscopio. Para obtener una capa uniforme, se coloca una lámina de acetato encima de la resina.
3. Exposición UV. La luz láser UV (405 nm) se expande y atraviesa una fotomáscara binaria (transparente/opaca). Se emplea un sistema óptico de cámara simple para proyectar el patrón al tamaño deseado sobre la resina.
4. Revelado y curado final. Se retira la lámina de acetato y se lava el portaobjetos expuesto con abundante alcohol isopropílico. Se realiza una exposición UV adicional para consolidar la estructura final.

El arreglo experimental se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Configuración del sistema de fotolitografía UV. Los componentes principales son: un diodo láser UV (405 nm, 100 mW); un expansor de haz de alta energía (con pinhole de 15 µm); un espejo de primera superficie; una lente Nikon con un adaptador de enfoque manual (Bellows PB 4) y un soporte ajustable para portaobjetos.

3. Resultados y discusión

3.1 Preparación de las partículas

En el proceso de fabricación de los patrones, tras curar la combinación de nanoestructuras y resinas en las regiones de interés, se realiza un lavado con alcohol isopropílico para retirar el exceso de material. Por ello, resulta necesario estudiar el comportamiento de las nanoestructuras cuando se exponen a cantidades considerables de dicho solvente. En la siguiente medición se muestra el espectro de extinción de las nanoestructuras sin alcohol y con dos concentraciones diferentes de alcohol isopropílico, observándose que no hay modificación en los picos de extinción (ver Figura 2). Esto permite concluir que el alcohol isopropílico no afecta a las nanoestructuras. Es importante destacar que el pico plasmónico a 614 nm corresponde a la resonancia principal de los nanotriángulos, el pico cercano a 400 nm corresponde a nanósferas residuales de la síntesis y el pico de longitud de onda más corta es la resonancia plasmónica asociada al espesor de los nanotriángulos.

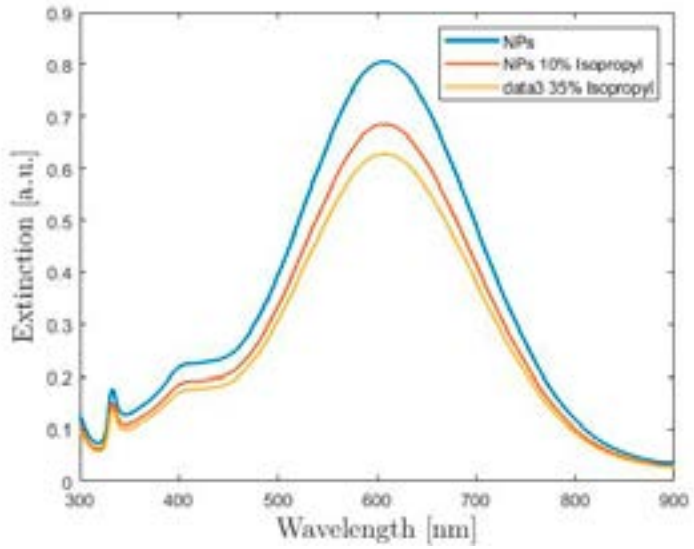
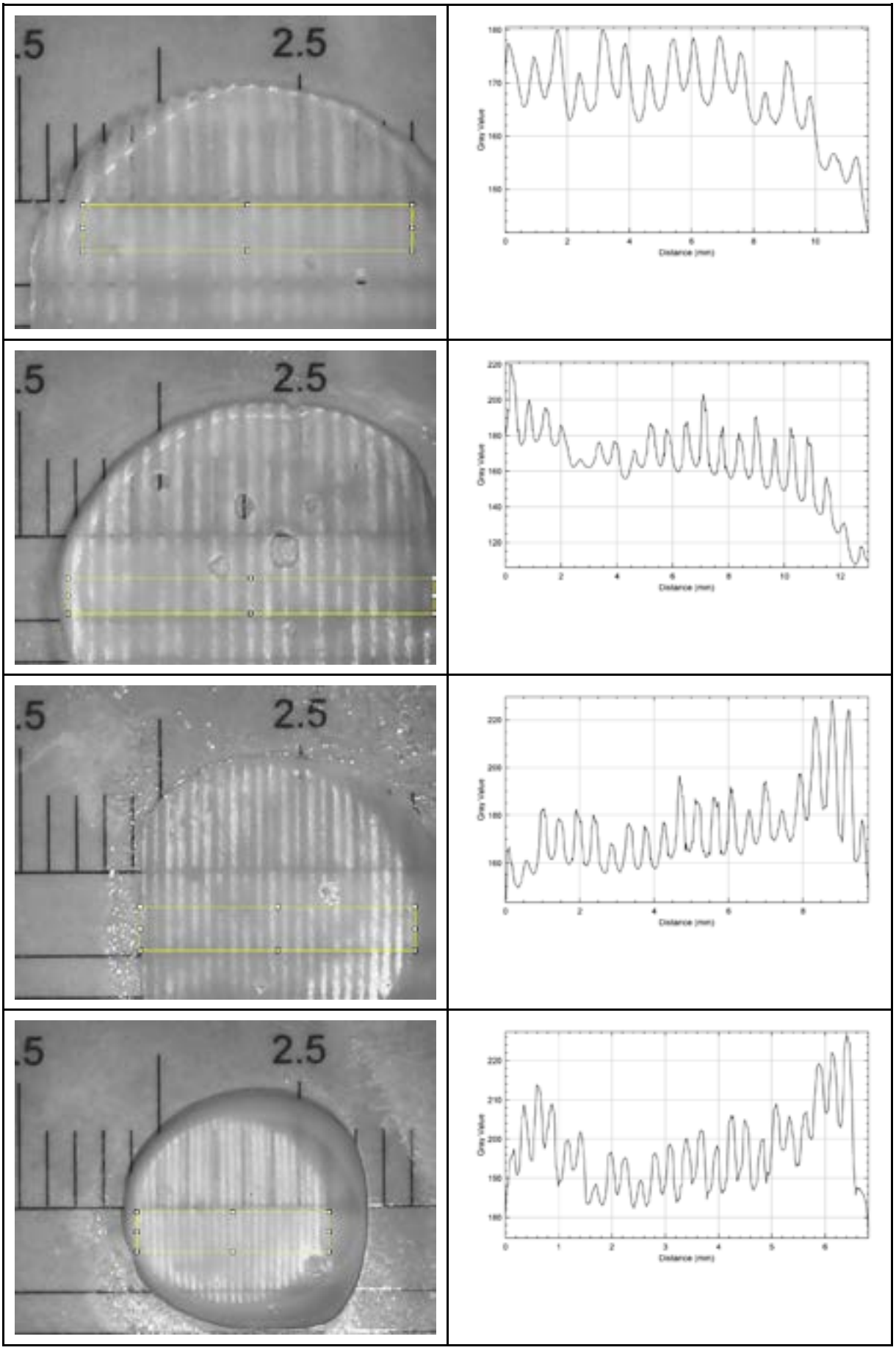


Figura 2. Espectro de extinción de las nanoestructuras triangulares en agua y disueltas en alcohol isopropílico.

3.2 Resolución y precisión

El sistema de litografía demostró la capacidad de producir patrones lineales de alta resolución con un control preciso del tamaño de las estructuras. Tal como se aprecia en la Figura 3, se lograron fácilmente patrones lineales con resoluciones que van de 1,5 a 6 líneas por milímetro. Estos resultados ponen de relieve la habilidad de la técnica para producir microestructuras finas y bien definidas (Figuras 3 y 4), validando la efectividad del sistema en la fabricación a microescala.


.5
2.5
Gray value
Distance (mm)

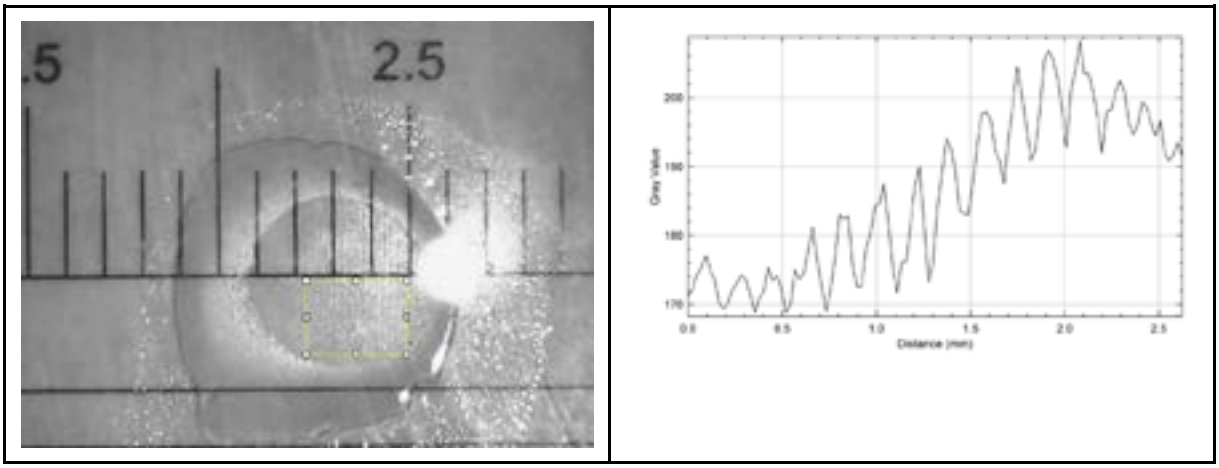


Figura 3. Izquierda: microestructuras lineales observadas en el microscopio. Las cajas amarillas indican la región de interés empleada para trazar los perfiles de intensidad (derecha) con el fin de estimar el número de líneas por milímetro.

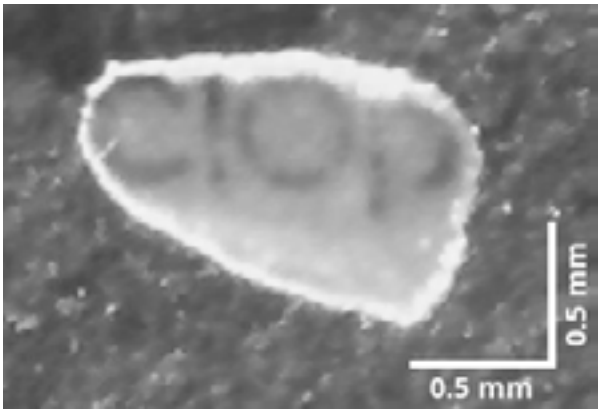


Figura 4. Reproducción de caracteres a pequeña escala. Fotolitografía con la palabra “CIOp” (~1 mm de ancho).

4. Conclusiones

El proceso de fotolitografía UV propuesto es sencillo, económico y capaz de producir estructuras de alta resolución con nanopartículas triangulares embebidas. Las propiedades fotoquímicas de las nanopartículas de plata se conservan dentro de la resina curada.

El uso de luz colimada y una máscara binaria garantiza que el patrón se mantenga enfocado incluso si varía la distancia entre la lámina y el plano focal predeterminado, lo que posibilita la replicación constante y precisa de microestructuras. Al ajustar la posición de la lente de proyección, se puede escalar el tamaño de los patrones impresos, proporcionando flexibilidad en la resolución y la fabricación sin sacrificar nitidez ni alineamiento. Esta configuración mejora el control y la eficiencia del proceso de microlitografía, haciéndolo adaptable a aplicaciones de alta resolución.

Las microestructuras fabricadas con nanopartículas triangulares de plata embebidas en resina fotosensible UV muestran un gran potencial para aplicaciones en fotónica, sensores y microelectrónica, donde la precisión del patrón y las propiedades fotoquímicas mejoradas son fundamentales. En trabajos futuros, se optimizará la concentración de nanopartículas en la resina y se explorarán diferentes patrones estructurales para mejorar la funcionalidad.

Asimismo, se investigará de forma sistemática cómo la integración en la resina afecta el comportamiento fotoquímico de las nanopartículas de plata, con el fin de potenciar aún más el rendimiento de estas microestructuras en aplicaciones tecnológicas avanzadas.

Agradecimientos
Este trabajo fue patrocinado parcialmente por:

- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I266).
- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina, Proyectos PICT Nº 4558 y PICT-2021-CAT-I-00074.
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), PIP Nº 11220220100080CO, Argentina.
- Financiamiento personal de Damián Gulich.

Bibliografía

1. Rai-Choudhury, P. (1997). Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography. SPIE PRESS. https://doi.org/10.1117/3.2265070

2. Tani,T. (2015). Silver Nanoparticles. doi:10.1093/acprof:oso/9780198714606.001.0001

3. Prasher, P., & Sharma, M. (2022). Silver Nanoparticles: Synthesis, functionalization and applications. Bentham Science.

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIBACTERIAL DE CERÁMICAS DE HIDROXIAPATITAS DOPADAS CON ZINC.

Guerra-López[a,b*], José R., Bianchi[c,d], Ana. Ramos[a], Marcelo, Ubertino[a], Mauro, Ferraresi-Curotto[c], Verónica, Güida[d,e], Jorge A., Rau[f,g,], Julietta V., Barbaro[h], Katia, Grigorieva[g], Viktoria Yu, Echeverría[c,d]. Gustavo A

[a] Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, ruta 5 y 7, CC 6700, Luján, Argentina.
[b]Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES, CONICET-UNLu), 6700 Luján, Buenos Aires, Argentina.
[c]Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP y IFLP (CONICET, CCT La Plata), C.C. 67, 1900 La Plata, Argentina.
[d] Departamento de Ciencias Básicas Facultad de Ingeniería, UNLP. 115 y 49. 1900 La Plata. Argentina.
[e] CEQUINOR (CCT-La Plata), Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, CC 962, 1900, La Plata, Argentina.
[f]Istituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, ISM-CNR, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma, Italy.
[g]Department of Analytical, Physical and Colloid Chemistry, Institute of Pharmacy, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Trubetskaya8, build. 2, 119048 Moscow, Russia.
[h] Instituto Zooprofilattico Sperimentale Lazio e Toscana “M. Aleandri”, Via Appia Nuova, 00178, Rome, Italy.

joseguerralopez1@gmail.com

1. Introucción

Los materiales biocerámicos constituyen una nueva clase de biomateriales ampliamente utilizados para reemplazar tejidos óseos dañados. Estos elementos tienen la capacidad de unirse directamente con los tejidos óseos a reparar [1]. Dentro de estas sustancias destaca, por su uso, la hidroxiapatita sintética ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) (CaHAp). Actualmente, las infecciones asociadas a los implantes quirúrgicos representan una de las principales causas de fracaso de los implantes. Por este motivo, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las propiedades antibacterianas de diferentes hidroxiapatitas dopadas con zinc (Zn-Hap), sintetizadas mediante un método desarrollado en nuestros laboratorios [2].

2. Experimental

2.1. Síntesis de la hidroxiapatita

La síntesis de la hidroxiapatita sin dopar (CaHap) se realizó siguiendo el método descrito por Gibson y Bonfield [3], basado en la reacción de neutralización entre $Ca(OH)_2$ y H_3PO_4. Para ajustar el pH a 9 se utilizó una disolución de NH_3 al 25 %. Finalmente, el sólido se filtra y se seca en una estufa a 105(5) °C durante la noche.

2.2. Síntesis de la hidroxiapatita dopada con *Zn(II)*

Como se describió previamente [2], la síntesis se desarrolló en 3 pasos. En una primera etapa, se calculan de forma estequiométrica las cantidades a utilizar de: ($Ca(OH)_2$, H_3PO_4 y $ZnCl_2$) con el objetivo de obtener una relación molar (Ca^{2+}+Zn^{2+})/P de 1,67. En segundo lugar, se utilizó NaOH en una relación estequiométrica con $ZnCl_2$. Por último; el producto de la síntesis se mantuvo en reflujo toda la noche a una temperatura de 98 ºC, lo que dio como resultado la eliminación del agua por evaporación. Las muestras se nombraron teniendo en cuenta la relación (Zn/(Ca+Zn))x100: HA, Zn-HA: Zn3-HA, Zn5-HA y Zn10-HA.

2.3. Aislamiento de Células Estromales Mesenquimatosas

Las células estromales mesenquimatosas (AMSC) fueron aisladas del tejido adiposo de un equino macho de 24 meses de edad, sacrificado. El tejido fue triturado y colocado en un medio

de crecimiento DMEM (Life Technologies, Paisley, Reino Unido), contenido en un matraz de cultivo, suplementado con 10 % de suero fetal bovino (FBS, Life Technologies, Paisley, Reino Unido) a 37 °C con 5 % de CO_2.

2.4. Prueba MTT

Para evaluar la toxicidad de Zn-HA a diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10%), las AMSCs fueron cultivadas en presencia de las respectivas muestras, seguidas de la prueba MTT. Esta prueba mide la conversión del tinte amarillo MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltriazolio bromuro) en formazán morado por las mitocondrias en células vivas y viables. La cantidad de formazán se determinó midiendo la absorbancia a 600 nm.

2.5. Diferenciación Osteogénica

En la fase 3 las AMSCs fueron sembradas a una densidad de 50.000 células/mL en placas con 6 compartimientos e incubadas a 37°C con 5% de CO_2. Después de un día, se añadió el medio de diferenciación osteogénica (50 µg/mL de ácido ascórbico, 10 mM de β-glicerofosfato y 10^{-7} M de dexametasona, todos de Merck, Darmstadt, GE) el cual contenía 1 mg/mL de Zn-HA a diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %). El control negativo consistió en las AMSCs cultivadas en el medio de crecimiento, mientras que el control positivo consistió en las AMSCs cultivadas en el medio de diferenciación osteogénica. Cada experimento fue replicado tres veces. Las AMSCs fueron mantenidas a 37°C con 5% de CO_2, renovando el medio específico cada 48-72 horas durante un período de 21 días y teñidas con Alizarina Roja S (Merck, Darmstadt, GE), que resalta los depósitos de calcio en rojo. Las AMSCs fueron fijadas con paraformaldehído al 4% durante 30 minutos a temperatura ambiente, enjuagadas y luego teñidas con solución de Alizarina Roja S al 3% durante 30 minutos. Después de cuatro lavados, los depósitos rojos de calcio fueron visibles en la matriz extracelular. Se tomaron fotos utilizando un microscopio óptico invertido (Nikon, Eclipse TE 2000-U). Para cuantificar la mineralización de la matriz extracelular, las AMSCs teñidas fueron tratadas con una solución de 5% de lauril sulfato de sodio en HCl 0.5 N (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) durante 30 minutos. De cada una se analizó 1 mL para determinar la densidad óptica a 490 nm usando un biofotómetro, siguiendo el método descrito por Pang et al. [3].

2.6. Actividad Antimicrobiana

Las propiedades antimicrobianas de las muestras policristalinas de Zn-HA a diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %) fueron estudiadas utilizando cuatro especies bacterianas (*E. coli, S. aureus, P. aeruginosa y E. faecalis*) y una especie fúngica (*C. albicans*). Todas las sustancias fueron esterilizadas en autoclave a 121°C durante 20 minutos. Todos los microorganismos fueron cultivados en caldo Brain Heart Infusion (BHI) (DIFCO, Sparks, USA) en presencia de 1 mg/mL de los distintos sustratos durante 24 horas. Los cultivos bacterianos se mantuvieron a 37 °C, mientras que el cultivo fúngico se mantuvo a 28 °C. El control positivo para cada experimento consistió en cultivar cada microorganismo solo en BHI. Todos los experimentos fueron realizados por triplicado. La proliferación microbiana fue cuantificada mediante medidas de la densidad óptica a 600 nm usando un BioFotómetro (Eppendorf, Hamburgo, Alemania).

2.7. Análisis Estadístico

Todos los ensayos fueron replicados tres veces. Los valores de la prueba MTT, la cuantificación de Alizarina Roja S y las tasas de crecimiento microbiano se expresaron como el valor medio ± la desviación estándar (DE) y se sometieron a un análisis estadístico utilizando la prueba no paramétrica de Dunnett para comparaciones múltiples (usando el software Sas Jmp Statistical Discovery v14 pro, Milán, Italia). Se consideraron estadísticamente significativos los valores de $p \leq 0.05$*, ≤ 0.01**, y ≤ 0.001***, según se indica en rótulo de la Figura 1.

3. Resultados

3.1. Ensayo MTT

En el tercer paso se evaluó la toxicidad de los substratos Zn-HA en el crecimiento de las AMSCs por medio del ensayo MTT a diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10%). La Figura 1 muestra el porcentaje de crecimiento celular obtenido a partir de tres ensayos experimentales. El crecimiento celular de las AMSCs en condición de control (crecidas sin el agregado de los distintos sustratos), se estableció como 100 %. Específicamente, el porcentaje de crecimiento de las AMSCs fue de 99.92 % en presencia de HA, 103.36 % en presencia de Zn-HA 3 % Zn, 101.10 % en presencia de Zn-HA 5 % Zn y 100.13 % en presencia de Zn-HA 10 % Zn, en comparación con las AMSCs cultivadas en ausencia de los sustratos. Las diferencias observadas en el crecimiento celular entre las distintas condiciones experimentales y el substrato de control no fueron estadísticamente significativas.

3.2. Diferenciación Osteogénica

Se indujo la diferenciación osteogénica de las AMSCs en presencia y ausencia de los distintos sustratos de Zn-HA con concentraciones de Zn del 0 %, 3 %, 5 % y 10 %. Los depósitos de calcio formados en la matriz extracelular, característicos de la diferenciación osteogénica, fueron teñidos de rojo con Alizarina Roja S. Como se observa en las imágenes de la Figura 2, las AMSCs diferenciadas en presencia de todos los sustratos de Zn-HA con diferentes

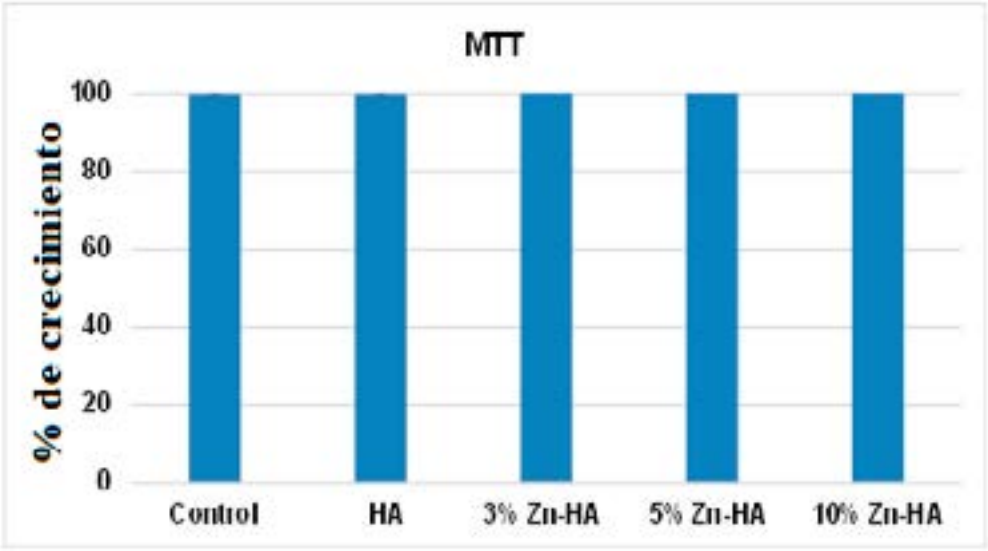


Figura 1(ensayo MTT): porcentaje de crecimiento de las AMSCs cultivadas durante 24 horas en ausencia (control celular) y en presencia de Zn-HA con diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %). Los valores se obtuvieron de tres experimentos y se expresan como el valor medio porcentual ± D.E. El control celular corresponde al 100 % de crecimiento.

concentraciones de Zn adquirieron un fenotipo osteogénico. Las imágenes de la Figura 2 muestran la diferenciación osteogénica de las AMSCs bajo distintas condiciones experimentales tras la tinción con Alizarina Roja S.

En la Figura 3 se muestra la cuantificación de la Alizarina Roja S en la matriz extracelular de las AMSCs. La cantidad de colorante detectada es proporcional al contenido de calcio en la matriz extracelular tras la diferenciación osteogénica. En comparación con el control, la tinción fue 1.24 veces mayor en presencia de HA, 1.29 veces mayor con Zn-HA al 3 %, 1.20 veces mayor con Zn-HA al 5 % y 1.09 veces mayor con Zn-HA al 10 %. Los depósitos de calcio teñidos fueron significativamente mayores en las muestras de Zn-HA al 3 % y al 5 %, en comparación con el control

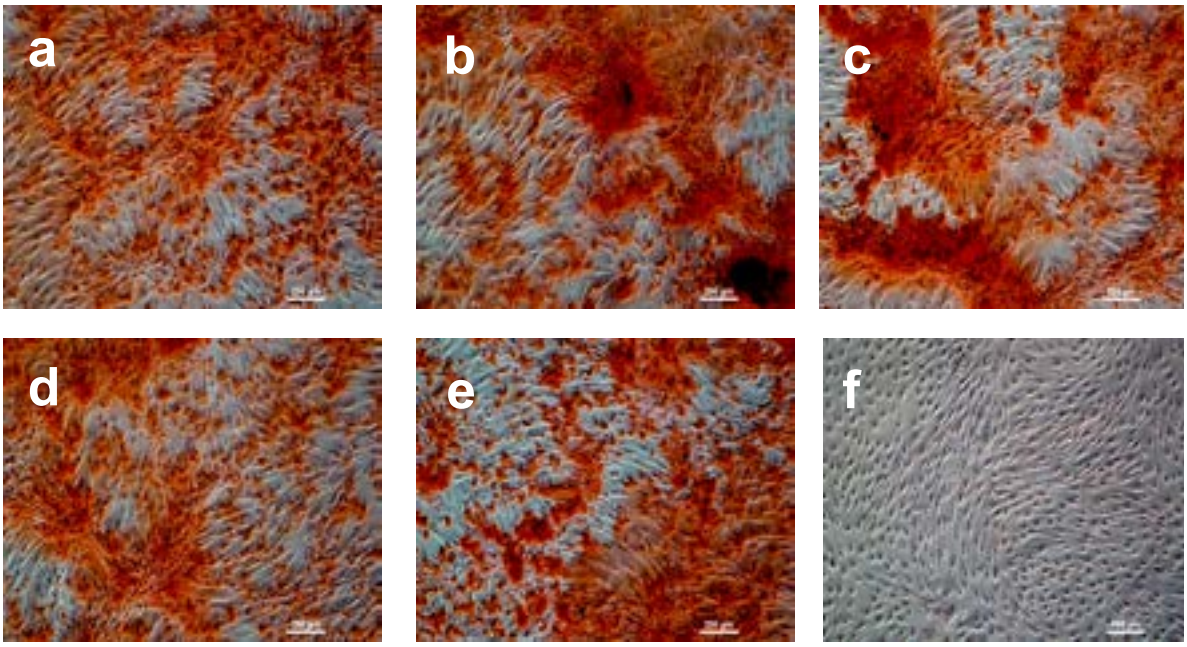


Figura 2: Tinción con Alizarina Roja S de las AMSCs sometidas a diferenciación osteogénica. (a) Control positivo (AMSCs diferenciadas en ausencia de sustratos). (b) AMSCs diferenciadas en presencia de HA. (c) AMSCs diferenciadas en presencia de Zn-HA al 3 %. (d) AMSCs diferenciadas en presencia de Zn-HA al 5 %. (e) AMSCs diferenciadas en presencia de Zn-HA al 10 %. (f) AMSCs cultivadas en el medio de crecimiento. Las imágenes fueron capturadas con un microscopio invertido a 10x.

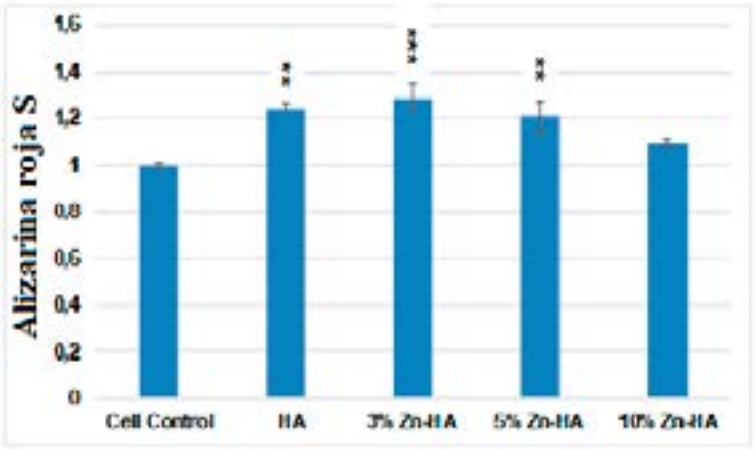


Figura 3: Cuantificación de Alizarina Roja S en AMSCs sometidas a diferenciación osteogénica en ausencia (control positivo) y presencia de los sustratos de Zn-HA con diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %). Los valores reportados se obtuvieron de tres experimentos independientes y se expresan como el valor medio porcentual ± D.E. El control positivo corresponde a 1. Valores de *p* (prueba de Dunnett): p ≤ 0.01** y p ≤ 0.001*** en comparación con el control celular positivo.

3.3 Actividad Antimicrobiana

El crecimiento de microorganismos (*E. coli, S. aureus, P. aeruginosa, E. faecalis y C. albicans)* en ausencia y presencia de Zn-HA con diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %) se muestra en la Figura 4. El control positivo consistió en el cultivo del correspondiente microorganismo en ausencia de los sustratos durante 24 horas a la temperatura óptima de crecimiento. El porcentaje de crecimiento y la desviación estándar (S.D.) se obtuvieron del promedio de tres experimentos independientes (Figura 4).

i) El crecimiento de *E. coli* cultivado en presencia de HA fue del 100.40 %, del 95.69 % en presencia de Zn-HA al 3 %, del 90.05 % en presencia de Zn-HA al 5 % y del 68.20 % en

presencia de Zn-HA al 10 %, en comparación con el cultivo de control. Solo la inhibición del crecimiento en presencia de Zn-HA al 10 % fue estadísticamente respecto al cultivo de control.
ii) El crecimiento de la *E. Faecalis* cultivado en presencia de HA fue del 101.62 %, del 82.73 % en presencia de Zn-HA al 3 %, del 73.58 % en presencia de Zn-HA al 5 % y del 63.54 % en presencia de Zn-HA al 10 %, respecto al cultivo de control.
iii) Para la *P. aeruginosa*, el crecimiento en presencia de HA fue del 100.26 %, del 95.30 % en presencia de Zn-HA al 3 %, del 60.24 % en presencia de Zn-HA al 5 % y del 52.51 % en presencia de Zn-HA al 10 %, respecto del cultivo de control.
iv) El crecimiento de la *S. aureus* cultivada en presencia de HA fue 99.45 %, del 88.66 % con Zn-HA al 3 %, del 70.96 % con Zn-HA al 5 % y del 59.05 % con Zn-HA al 10 %, respecto al cultivo.
v) El crecimiento del hongo *C. albicans* cultivado en presencia de HA fue del 97.61 %, del 84.11 % en presencia de Zn-HA al 3 %, del 76.98 % en presencia de Zn-HA al 5 % y del 75.26 % en presencia de Zn-HA al 10 %, respecto al cultivo de control.
Para las cepas bacterianas *E. faecalis*, *P. aeruginosa, S. aureus y el hongo C. albicans*, solo la inhibición del crecimiento en presencia de Zn-HA al 5 % y 10 % fue estadísticamente significativas.

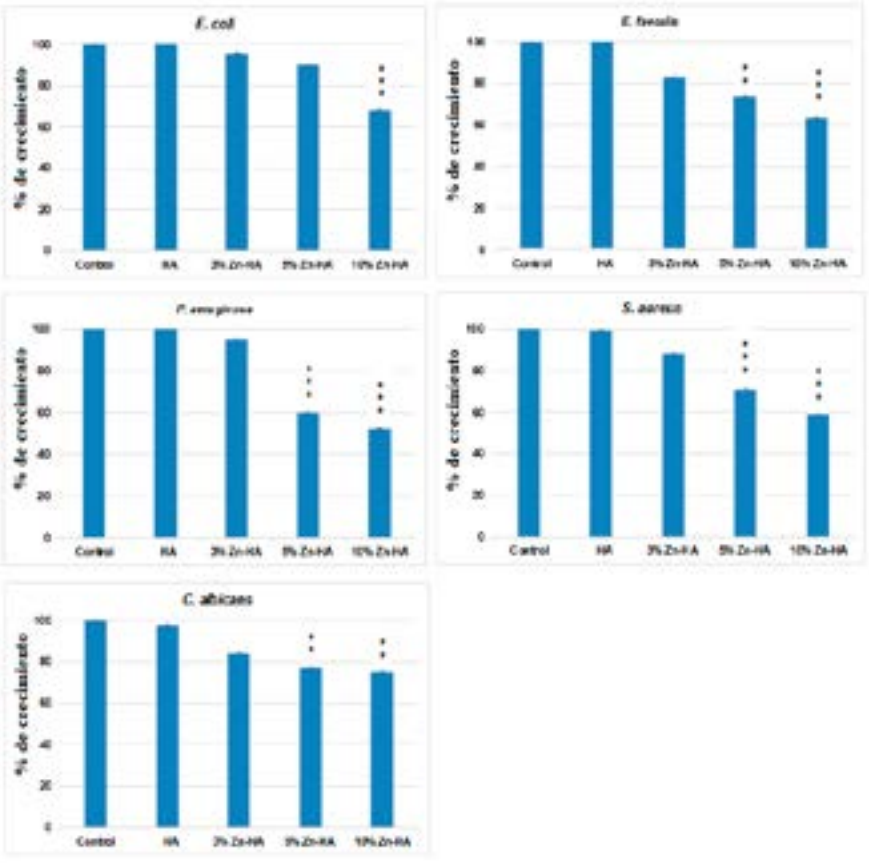


Figura 4. Tasa de crecimiento de las cepas bacterianas *E. coli, E. faecalis, S. aureus y P. aeruginosa*, y del hongo *C. albicans*, cultivados en presencia y ausencia de Zn-HA en diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 % y 10 %). Los valores reportados corresponden al promedio de tres experimentos independientes, expresados como el valor medio porcentual ± S.D., en comparación con el control positivo, que corresponde al 100 %. Valores de *p* (prueba de Dunnett): p ≤ 0.05*, *p ≤ 0.01*** y *p ≤ 0.001**** en comparación con el cultivo de control.

4. Discusión

Los estudios sobre la biocompatibilidad de los sustratos de Zn-HA a diferentes concentraciones de Zn (0 %, 3 %, 5 %, y 10 %) muestran que estos materiales son no tóxicos para el crecimiento de las AMSCs, con un crecimiento comparable al de las células control. Además, los sustratos demostraron ser eficaces para inhibir el crecimiento de bacterias como *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis* y el hongo *C. albicans*, siendo especialmente efectivos el Zn-HA al 10 %, que inhibió todos los microorganismos, y el Zn-HA al 5 %, que inhibió los microorganismos *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis* y *C. albicans*.

Las características de biocompatibilidad y la acción antibacteriana de los sustratos de Zn-HA a diferentes concentraciones de Zn posicionan a estos materiales como elementos clave para el desarrollo futuro de la ingeniería de tejidos. Su capacidad para soportar el crecimiento y la diferenciación de células madre, sin efectos tóxicos, y para inhibir el crecimiento de microorganismos, los convierte en herramientas poderosas para la medicina regenerativa, abriendo nuevos caminos para tratamientos innovadores y efectivos.

5. Conclusión

La prueba de actividad antimicrobiana demostró que tanto el cultivo en presencia de Zn-HA al 5 wt % como el Zn-HA al 10 wt % fueron efectivos para inhibir el crecimiento de los cinco microorganismos probados. Cabe destacar que los mejores resultados se observaron para Zn-HA al 10 %, con un porcentaje de inhibición del 50.16 % contra *S. aureus*, 36.46 % contra *E. faecalis*, 47.49 % contra *P. aeruginosa* y 31.8 % contra *E. coli*.

6. Referencias

1. Madeeha Riaza, RehanaZia, Ayeshaljaz, TousifHussain, MunazaMohsin, Abdul Malik. Synthesis of monophasic Ag doped hydroxyapatite and evaluation of antibacterial activity. Materials Science & Engineering C 90 (2018) 308–3.

2. 9. J. R. Guerra-Lopez, A. E. Bianchi, M. A. Ramos, V. Ferraresi-Curotto, J. A. Güida, G. A. Echeverría. Novel synthesis and crystallographic results of zinc substituted hydroxyapatite with high thermal stability. Physica B: Condensed Matter 676 (2024) 415676. https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.415676.

3. Pang, Yunqing, et al. "The effect of liraglutide on the proliferation, migration, and osteogenic differentiation of human periodontal ligament cells." Journal of Periodontal Research 54.2 (2019): 106-114.

Preparación y caracterización de cerámicas de hidroxiapatitas dopadas con zinc

Guerra-López[a,b*], José R., Bianchi[c,d], Ana. Ramos[a], Marcelo, Ubertino[a], Mauro, Ferraresi-Curotto[c], Verónica, Güida[d,e], Jorge A., Rau[f,g], Julietta V., Barbaro[h], Katia, Grigorieva[g], Viktoria Yu, Echeverría[c,d]. Gustavo A

[a] Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, ruta 5 y 7, CC 6700, Luján, Argentina.
[b]Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES, CONICET-UNLu), 6700 Luján, Buenos Aires, Argentina.
[c]Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP y IFLP (CONICET, CCT La Plata), C.C. 67, 1900 La Plata, Argentina.
[d] Departamento de Ciencias Básicas Facultad de Ingeniería, UNLP. 115 y 49. 1900 La Plata. Argentina.
[e] CEQUINOR (CCT-La Plata), Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, CC 962, 1900, La Plata, Argentina.
[f]Istituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, ISM-CNR, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma, Italy.
[g]Department of Analytical, Physical and Colloid Chemistry, Institute of Pharmacy, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Trubetskaya8, build. 2, 119048 Moscow, Russia.
[h] Instituto Zooprofilattico Sperimentale Lazio e Toscana “M. Aleandri”, Via Appia Nuova, 00178, Rome, Italy.
joseguerralopez1@gmail.com

En los últimos años, el estudio de hidroxiapatitas (CaHap) ha adquirido gran interés por su potencial uso en la reparación del tejido óseo debido a la creciente necesidad de nuevos biomateriales con mejores propiedades osteointegradoras [1]. En este sentido, su papel como material de implante y relleno óseo se debe a su excepcional bioactividad, biocompatibilidad, osteoconductividad y estructura cristalográfica a causa de su similitud a la parte mineral del hueso. El presente estudio tiene como objetivo la caracterización de diferentes cerámicas de hidroxiapatitas dopadas con zinc (Zn-Hap), preparadas a partir de un método desarrollado en nuestros laboratorios [2]. Los materiales sintetizados fueron tratados térmicamente a dos temperaturas diferentes, 700 y 800 ºC. La estructura de las Zn-Hap sinterizadas, se estudió por difracción de rayos X (XRD), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía X de dispersión de energía (EDAX). Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que las cerámicas de Zn-Hap presentan propiedades prometedoras para su aplicación en la reparación del tejido óseo.

2. Experimental

2.1. Síntesis de la hidroxiapatita

La síntesis de CaHap se realizó siguiendo el método descrito por Gibson y Bonfield [3], basado en la reacción de neutralización entre $Ca(OH)_2$ y H_3PO_4. En una suspensión formada por la solución de $Ca(OH)_2$ se adiciona el H_3PO_4 a una velocidad de 0,30 ml/seg y a una temperatura (T) de 98 ºC. Para ajustar el pH a 9 se utilizó una disolución de NH_3 al 25%. Al concluir el sólido se filtra y se seca en estufa a 105(5) °C durante la noche.

2.2. Síntesis de las hidroxiapatitas dopadas con *Zn(II)*

Como se describió previamente [2], la síntesis se desarrolló en 3 pasos. En una primera etapa, se calculan de forma estequiométricalas cantidades a utilizar de: ($Ca(OH)_2$, H_3PO_4 y $ZnCl_2$) con el objetivo de obtener una relación molar (Ca^{2+}+Zn^{2+})/P de 1,67. En segundo lugar, se utilizó NaOH, también, en una relación estequiométrica con $ZnCl_2$. Por último; el producto de la síntesis se mantuvo en reflujo toda la noche a una temperatura de 98 ºC, lo que permitió disminuir el contenido de agua por evaporación. Se prepararon soluciones madre con concentraciones de 3, 5 y 10 % por mol de iones Zn(II). Las muestras se nombraron teniendo en cuenta la relación (Zn/(Ca+Zn))x100: HA, Zn-HA: Zn3-HA, Zn5-HA y Zn10-HA. Posteriormente fueron sometidas a un proceso de sinterización a 700 y 800 ºC.

2.3 Técnicas de caracterización

Las muestras de CaHap, Zn3, Zn5 y Zn10, sinterizadas a 700 y 800 °C, fueron caracterizadas utilizando técnicas de difracción de rayos X en polvo, FTIR, SEM y EDAX. La composición de las muestras, expresada en porcentaje en peso (wt%) y porcentaje en masa (at%), se determinó mediante EDAX, mientras que sus propiedades estructurales fueron analizadas utilizando el método de Rietveld y FTIR.

2.4 Espectro Infrarrojo

La Figura 1, muestra los espectros IR de la HA pura y las dopadas con zinc (Zn-HA) sinterizadas a 700 and 800 ºC. Como se observa en la misma, todas las muestras, exhiben las bandas características de los iones CO_3^{2-}, PO_4^{3-} y OH^- presentes en el cristal de una carbonatoapatita. En el caso de las muestras tratadas a 700 ºC, excepto Zn10-HA, no se evidencian bandas correspondientes a otras fases diferentes a la apatita.

La principal diferencia observada en estos espectros es un pequeño desplazamiento de las bandas asociadas a los estiramientos simétricos y antisimétricos del fosfato, de 1050 a 1046 cm^{-1} (ν_3) y de 960 a 963 cm^{-1} (ν_1), respectivamente. Este efecto fue menos evidente para los modos de estiramientos de este ion en 602 y 571 cm^{-1} (ν_4) y 474 cm^{-1} (ν_2). Como se describió anteriormente [2], la banda de estiramiento de las vibraciones del grupo OH^- experimenta un cambio menor a números de onda más bajos (de 3572 cm^{-1} en HA a 3569 cm^{-1} para muestras dopadas con zinc). Por el contrario, para el modo de libración, se observa un comportamiento opuesto y la banda asociada a este ion se desplaza hacia números de onda más altos (de 630 cm^{-1} en HA a 633 cm^{-1} para la misma concentración de muestra).

En la región 1500-1400 cm^{-1} se observan bandas muy intensas asociadas a los modos ν_3 del CO_3^{2-}. La presencia de un doblete en 870 cm^{-1} (ν_2) permite proponer que el CO_3^{2-} ocupa tanto las posiciones del hidroxilo (tipo A), como las del fosfato (tipo B) en la estructura [3, 4]. La intensidad de estas bandas indicaría que el CO_3^{2-} entra preferentemente en el sitio del fosfato.

La presencia de iones carbonato en las muestras es consecuencia de la interacción del dióxido de carbono atmosférico con una alta concentración de iones OH^- presentes durante toda la síntesis. Cabe señalar que la intensidad de estas bandas no aumenta con la incorporación de Zn(II).

Finalmente, en el caso de Zn10-HA, la banda más débil ubicada a 690 cm^{-1} indica la presencia de ZnO en esta muestra [5]. La presencia de ZnO en las muestras tratadas térmicamente puede atribuirse a la descomposición térmica de la fase carbonatoapatita dopada con zinc. Este resultado es consistente con los resultados del análisis Rietveld que se discutirá más adelante.

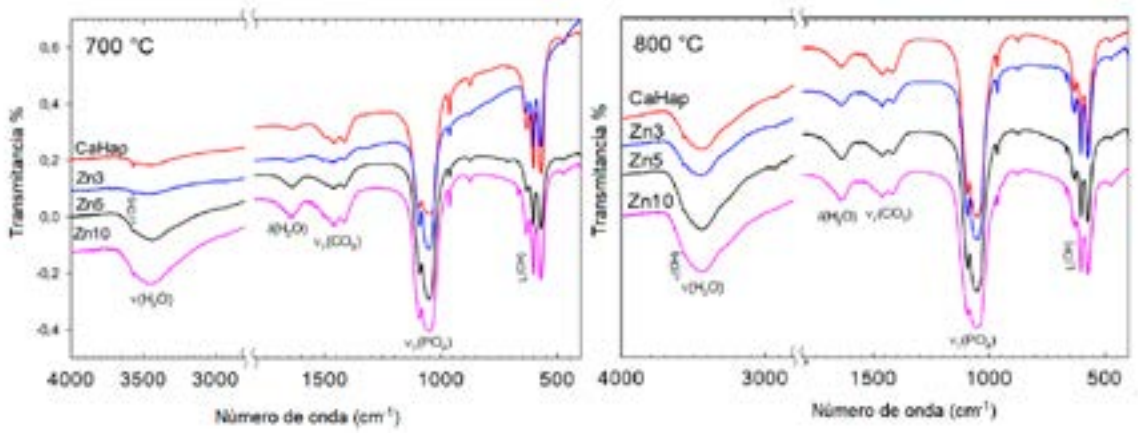


Figura 1. Espectros FTIR de HA y Zn-HA sinterizadas at 700 and 800 ºC.

En todos los espectros de las apatitas dopada con zinc tratadas a 800 °C, se observa que la banda de 690 cm^{-1} presenta una mayor intensidad en comparación con las tratadas a 700 °C (ver, por ejemplo, los espectros de Zn10-HA), lo que indica una mayor descomposición de carbonatos. Esa idea se ve reforzada por la disminución de todas las bandas asociadas con los iones carbonato en todos los rangos del espectro. El resto del espectro de las muestras sinterizadas a 800ºC, excepto en el caso de Zn10-HA, son muy similares y exhiben las bandas características de los iones CO_3^{2-}, PO_4^{3-} y OH^- descriptas anteriormente.
Por el contrario, en el espectro del Zn10-HA se advierten nuevas bandas en la región 1200-900 cm^{-1}. La presencia de bandas en 972 y 945 cm^{-1} debido a modos de estiramientos simétricos del fosfato (ν_1) y un hombro en 1123 cm^{-1} (ν_3) evidencian la presencia de la fase β-TCP en el sólido. Tal como se ha discutido ampliamente [2], la formación de esta fase es consecuencia del tratamiento térmico y de la menor estabilidad de la fase apatítica debido a la sustitución del calcio por zinc en la estructura. A menor frecuencia, la presencia del hombro a 545 cm^{-1}, atribuido al modo de flexión del fosfato (ν_4), confirma la existencia de una mezcla de fases fosfatadas. No obstante, cabe destacar que la intensidad de las bandas asociadas al β-TCP indica que esta fase es el componente inferior de la mezcla.

2.5 Resultados Químicos por EDAX

A partir de los resultados del análisis espectroscópico y EDAX pudo identificarse la presencia de iones carbonato, Ca, P, Na y Zn, ver Tabla 1. El estudio EDAX mostró que las muestras de apatita presentan valores de Ca/P cercanos a una CaHap estequiométrica (1,67), lo que sugiere una baja incorporación de iones carbonatos en la estructura.

Tabla 1. EDAX resultados de los análisis químicos de las muestras de HA y Zn-HA.

Atomico	HA		Zn3-HA		Zn5-HA	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
O	45,95	63,23	47,72	62,56	42,71	56,33
P	16,54	11,80	14,94	10,16	14,85	10,67
Ca	33,54	18,50	29,44	15,52	30,68	17,23
C	3,09	5,67	6,14	10,71	8,59	14,17
Zn	0.00	0.00	0,88	0,29	2,28	0,79
Na	0,16	0,15	0,33	0,30	0,47	0,44

2.6 DRX de polvo

La Figura 2 exhibe los DRX para las muestras HA, Zn3-HA, Zn5-HA, Zn10-HA en función de la temperatura, junto con el patrón calculado de la hidroxiapatita de Holly Springs [7]. Para HA y Zn10-HA, se observaron varios picos de baja intensidad que no pertenecen a la fase apatítica y desaparecieron con el tratamiento térmico. A partir de una búsqueda en la base de datos estructural Qualx [6], estos picos fueron identificados como carbonatos de calcio, con posible presencia de sodio de acuerdo con los resultados de EDAX (ver Tabla **1**), no contenidos en la estructura cristalina.

Luego del tratamiento térmico a 700 y 800 °C, para las muestras Zn3 y Zn5 se observaron nuevos picos, que fueron identificados como correspondientes a la fase de óxido de zinc según una búsqueda en la base de datos QualX [6]. En la muestra Zn10 tratada a 700 °C, además de los picos de óxido de zinc, se identificaron picos correspondientes a la fase de fosfato tricálcico, como se muestra en la Figura 2.

2.7 Análisis Rietveld

El refinamiento se realizó a partir de la estructura hexagonal ($P6_3/m$) de la hidroxiapatita de Holly Springs [7] y, cuando correspondía, se consideraron la fase hexagonal de del óxido de zinc Zincita ($P6_3mc$) [8] y la romboédrica del β-trifosfato de calcio ($R3c$) [9]. El mejor ajuste de los perfiles de línea se logró con las funciones pseudo-Voigt modificadas. Los siguientes parámetros se refinaron de forma incremental: el fondo, la escala, el desplazamiento de la muestra, la forma del perfil, los parámetros de red, así como el tamaño y la deformación isotrópica. Además, para la fase principal, la hidroxiapatita, también se refinaron la asimetría del pico, las posiciones atómicas y los factores de ocupación. Los resultados se listan en la Tabla 2.

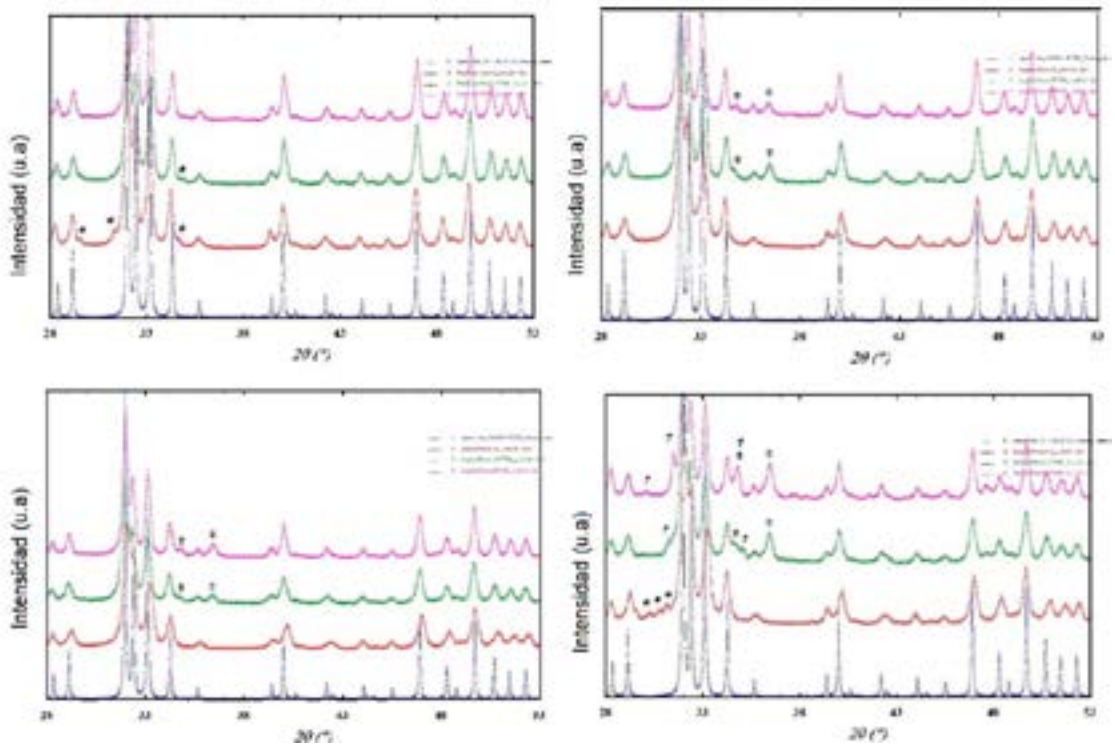


Figura 2. Patrones de DRX en polvo de HA, Zn3-HA, ZN5-HA y ZN10-HA, medidos en el rango de 28 < 2Θ < 53°, para las muestras sin y con tratamiento a 700 y 800 °C. Por comparación se incluye el DRX

teórico de la HA de Holly Springs [7]. Los picos no apatíticos se indican mediante los símbolos * (carbonatos), ‡ (óxido de zinc) y † (β-TCP).

Tabla 2. Parámetros de celda ***a*** y ***c*** (Å), volumen (Å³), porcentaje de fase (entre corchetes) para las muestras HA, Zn5-HA y Zn10-HA tratadas a temperatura ambiente (RT), 700 y 800 °C.

Muestra	Fase		RT	700	800
HA	Apatita	a	9.4030	9.4030	9.4080
		c	6.8883	6.8839	6.8837
		Vol	527.45 [100 %]	527.11 [100 %]	527.66 [100 %]
Zn5	Apatita	a	9.3776	9.4024	9.4093
		c	6.8884	6.8817	6.8827
		Vol	524.61 [100%]	526.87 [98%]	527.74 [97%]
	ZnO	a	----------	3.2530	3.2538
		c		5.1836	5.1792
		Vol		47.51 [2%]	47.49 [3%]
Zn 10	Apatita	a	9.3771	9.4090	9.4116
		c	6.8947	6.8829	6.8810
		Vol	525.03 [100%]	527.71 [86%]	527.85 [83%]
	TCP	a	----------	10.3094	10.3521
		c		37.3107	37.0550
		Vol		3434.29 [9%]	3439.10 [11%]
	ZnO	a	----------	3.2498	3.2537
		c		5.2050	5.1786
		Vol		47.61 [5%]	47.48 [6%]

3. Discusión

Del análisis Rietveld, para las muestras HA, Zn5-HA y Zn10-HA no tratadas térmicamente (ver Tabla 2) se observa una contracción en el parámetro ***a*** de la celda hexagonal, mientras que ***c*** permanece casi invariable, lo que resulta en una pequeña reducción del volumen. Este comportamiento es consistente con el menor valor del radio iónico del Zn(II) respecto del Ca(II) y sugiere, de acuerdo con resultados previos reportados por nosotros [2], la incorporación de los cationes de zinc en la estructura de la hidroxiapatita. A mayor concentración de los cationes de zinc incorporados en la estructura de la hidroxiapatita, mayor es la contracción del parámetro ***a*** y del volumen de la celda. Contrariamente, para las muestras tratadas térmicamente a 700 y 800 °C, no se observa la típica contracción del parámetro de celda ***a*** y la reducción del volumen registrado en las muestras sin tratar. Además, en Zn5-HA y Zn10HA aparecen picos adicionales asociados a dos nuevas fases, correspondientes a la zincita (ZnO) y al β-TCP.

Por otro lado, los resultados de FTIR y EDAX muestran que las muestras HA dopadas con zinc sinterizadas a 700 y 800 ºC contienen pequeñas cantidades de iones de carbonato. Además, las posiciones de las bandas son indicativas de que este ion ocupa tanto las posiciones del hidroxilo (tipo A) como de fosfato (tipo B) [2-4]. La presencia de iones carbonato en la estructura es clave, ya que su presencia permite explicar la formación de ZnO durante el proceso de sinterización. La incorporación de carbonato en la estructura apatítica puede explicarse por la alta concentración de iones OH^- durante todo el proceso de síntesis y por la presencia de CO_2 en la atmósfera. La

incorporación de iones carbonato produce una inestabilidad adicional a la generada por los iones Zn(II) presentes en la estructura [3, 4]. No obstante, de acuerdo con los resultados de DRX y FTIR se puede inferir que su incorporación al sólido es pequeña.
Además, en el caso de Zn10-HA sinterizada a 800 ºC, se observa una descomposición parcial apreciable de la estructura apatítica, en concordancia con estudios previos publicado por nosotros [2], donde la sustitución parcial del calcio por zinc y a la creación de vacantes se atribuyen a posibles factores que promueven la transformación, de acuerdo con la siguiente reacción.

$$(Ca,Zn)_{10-x}(PO_4)_6(OH)_{2-2x} \longrightarrow z\,\beta-(Ca,Zn)_3(PO_4)_2 + (Ca,Zn)_{10-x-3z}(PO_4)_{6-2z}(OH)_{2-2x-2y}O_yV_y + y\,H_2O$$

Donde z es la fracción molar de la fase β-TCP. Así, cuando la temperatura aumenta, las HA dopadas con zinc favorecen no solo la formación de ZnO, sino también la de β-TCP.
Los resultados presentados anteriormente muestran que el procedimiento de sinterización a 700 ºC y 800 ºC es ideal para la preparación de dos biocerámicas diferentes. Cabe destacar que la presencia de un menor porcentaje de ZnO, debido a la reacción de descomposición del carbonato, no tiene influencia negativa en las propiedades de estos materiales [1]. Por lo que su presencia en el sólido no debería afectar sus propiedades como biomaterial.

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se sintetizaron hidroxiapatita dopadas con diferentes concentraciones de zinc (Zn-HA). Los análisis FTIR y DRX revelaron que, en todos los casos, se obtuvo un carbonato apatito A-B sustituida con Zn (II). Estos resultados mostraron, además, que la fase de carbonato apatita permaneció estable térmicamente hasta 700 ºC. Sin embargo, a 800 ºC, la muestra de Zn10-HA mostró una mezcla de fases compuesta principalmente de carbonato apatita, con concentraciones más pequeñas de β-TCP y ZnO.

Referencias.

1. S. V. Dorozhkin, Bioceramics of calcium orthophosphates, Biomaterials 31 (2010) 1465–1485, https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.050.
2. J. R. Guerra-López, A. E. Bianchi, M. A. Ramos, V. Ferraresi-Curotto, J. A. Güida, G. A. Echeverría. Novel synthesis and crystallographic results of zinc substituted hydroxyapatite with high thermal stability. Physica B: Condensed Matter 676 (2024) 415676. https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.415676.
3. I. R. Gibson, W. Bonfield, Preparation and characterization of magnesium/carbonate co-substituted hydroxyapatites, J. of Materials Science: Materials in medicine. 13, 2002, pags. 685-693. https://doi.org/10.1023/A:1015793927364.
4. M. E. Fleet, X. Liu. Location of type B carbonate ion in type A-B carbonate apatite synthesized at high pressure. J. Solid State Chemistry 177, 2004, pags. 3174-3182. https://doi: 10.1016/jssc.2004.04.002.
5. G. Mahmood Abdelghani, A. BenAhmed, A. Basim Al-Zubaidi. Synthesis, characterization, and the infuence of energy of irradiation on optical properties of ZnO nanostructures. Nature portfolio. 2022, 12:20016. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24648-x
6. A. Altomare, N. Corriero, C. Cuocci, A. Falcicchio, A. Moliterni and R. Rizzi, QualX (version 2.24). A program for qualitative analysis by diffraction data by Institute of Crystallography (IC)-CNR - Bari, Italy.
7. K. Sudarsanan and R. A. Young, Significant precision in crystal structural details. Holly Springs hydroxyapatite. Acta Crystallogr. B25 (1969) 1534–1543.] (26204-ICSD). https://doi.org/10.1107/S0567740869004298
8. J. Albertsson, S. C. Abrahams and A. Kvick, Acta Crystallogr. B45 (1989) 34- 40.
9. T. Kamiyama, A. Hoshikawa, M. Yashima and A. Sakai, Journal of Solid State Chemistry 175 (2003), 72-277.

MODELADO MATEMÁTICO DE LAS RELCIONES DE ADITIVIDAD Y DOMINANCIA EN RUTAS METABÓLICAS

Melgarejo, Augusto Argentino [1], Roig, Alejandro Ramón [1], Ramirez, Bárbara Sofía [1] y Lodeiro, Aníbal Roberto [2,3]

1. Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, UNLP, Argentina. (augusto.melgarejo@ing.unlp.edu.ar).
2. Cátedra de Genética, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.
3. Instituto de Biotecnología y Biología Molecular, UNLP y CCT-La Plata, CONICET, Argentina.

1. Introducción

La problemática de la genética en los seres vivos comprende dos aspectos fundamentales: la acción de los genes y su herencia. El primer aspecto, también llamado *expresión génica*, estudia el pasaje de la información contenida en el ADN a las macromoléculas (mayormente, proteínas) que la van a ejecutar. Una parte importante de las proteínas son las enzimas, catalizadores biológicos que dirigen y regulan las vías metabólicas en las cuales una diversidad de moléculas, conjuntamente llamadas metabolitos, se transforman liberando o consumiendo energía biológica. Ciertos metabolitos, como por ejemplo los pigmentos, pueden acumularse en determinados tejidos dando así origen a manifestaciones visibles de la actividad génica, las cuales llamamos *fenotipos*. En cuanto a la herencia, ciertas especies, mayormente de animales y plantas, poseen dos copias de su material genético. En el caso de los humanos, poseemos toda nuestra información genética repartida en 23 cromosomas repetidos en dos juegos, de modo tal que poseemos un total de 46 cromosomas en cada uno de los núcleos de nuestras células, más una pequeña parte, extracromosomal, en otros orgánulos llamados mitocondrias. Cada uno de los juegos de cromosomas proviene de un progenitor, con lo cual, para cada gen poseemos una copia de origen materno y otra de origen paterno. Debido a la variación genética, ambas copias difieren levemente entre sí, lo que constituye el *genotipo*. Estudiar la herencia de los cromosomas, y cómo los genotipos se van modificando a lo largo de las generaciones tanto en familias como en poblaciones, es el otro gran problema de la genética.

Así, la relación entre genotipo y fenotipo resulta fundamental para el análisis genético. En el ámbito de la genética cuantitativa, que estudia genes cuya manifestación fenotípica es cuantificable (p.ej. pesos, tamaños, concentraciones de azúcares, ácidos orgánicos, etc.), esta conexión se formula en términos de efectos génicos aditivos a y de dominancia d. En organismos diploides, a representa la mitad de la diferencia en el valor fenotípico entre dos genotipos homocigotas parentales contrastantes, P_1 y P_2, y d, la desviación de la progenie híbrida H desde el punto medio $M = (P_1 + P_2)/2$ entre los dos progenitores. En este contexto, a y d pueden escribirse como [1]

$$a = (P_2 - P_1)/2 \;\; y, \;\; d = H - M. \tag{1}$$

Una ruta metabólica sencilla puede ser representada por una serie de reacciones metabólicas catalizadas por enzimas internas E_i, estando cada enzima codificada en un gen diferente:

$$J_e \rightarrow S_1 \underset{E_1}{\overset{J_1}{\rightarrow}} S_2 \underset{E_2}{\overset{J_2}{\rightarrow}} S_3 \rightarrow ... \rightarrow S_n \underset{E_n}{\overset{J_n}{\rightarrow}} S_{n+1} \rightarrow J_e, \tag{2}$$

donde J_e representan el flujo de entrada y salida de la ruta representado por la relación Michaelis-Menten irreversible

$$J_e = k_{cat,e} E_e \frac{S_n}{S_n + k_{M,e}}, \tag{3}$$

donde E_e representa la concentración de la enzima externa.

Dado que los valores de a y d dependen del genotipo, en este trabajo intentamos vincular el contenido de enzima E_i codificada por un gen dado G_i con el valor de a y d en P_1, P_2 y H suponiendo que, para P_2, la concentración de E_i es el doble que para P_1 y que, para H, la concentración de E_i se encuentra en el punto medio entre las de P_1 y P_2 [2, 3, 4, 5]. Utilizando la ecuación de Michaelis-Menten reversible

$$J_i = \frac{k_{cat,i} E_i \left(S_i - S_{i+1}/k_{eq}\right)}{S_i + k_{M,S_i}\left(1 + S_{i+1}/k_{M,S_{i+1}}\right)} \tag{4}$$

para calcular los flujos metabólicos en estados estacionarios fuera del equilibro a través de un modelo matemático consistente en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas, representamos la ruta metabólica donde vinculamos las concentraciones del metabolito S_i consumido o S_{i+1} producido por la enzima E_i en P_1, P_2 y H, las que definen los valores de a y d.

2. Metodología

2.1 Grado de dominancia y concentración enzimática

Realizamos los cálculos para diferentes valores del flujo metabólico, lo que nos permite representar la manera en que la ruta se acopla con su entorno. Así, podemos explicar las condiciones metabólicas de P_1, P_2 y H para las cuales se cumplen las situaciones de dominancia completa (cuando el valor fenotípico del híbrido es igual al del progenitor de mayor valor), dominancia parcial (cuando el valor fenotípico del híbrido es intermedio entre el valor del progenitor mayor y el punto medio) y no-dominancia (cuando el valor del híbrido coincide con el punto medio entre P_1 y P_2) [6]. Además, teniendo en cuenta que el grado de dominancia

$$p = d/a \tag{5}$$

es un valor entre 0 y 1, pudimos demostrar que la concentración de enzima E_m, requerida para manifestar un fenotipo cuyo valor se encuentre en el punto intermedio entre P_1 y P_2, está dada por $E_m = pE_{P_1} + (1-p)\,E_H$, donde E_{P_1} y E_H representan las concentraciones de enzima en el progenitor P_1 y en el híbrido, respectivamente. Observamos, además, que los rangos de E_i y S_i donde se cumplen estas condiciones dependen del valor del flujo metabólico, con lo cual obtenemos una explicación molecular para el conocido efecto ambiental sobre el valor fenotípico. En particular, a medida que aumenta el valor del flujo metabólico, los rangos en los cuales se manifiestan los diferentes tipos de dominancia se amplían. Sin embargo, en las etapas intermedias de la ruta metabólica las variaciones, tanto en las concentraciones de metabolitos como en la amplitud del rango en el que se manifiestan las diferentes relaciones de dominancia, se minimizan.

2.2. Modelo matemático y estado del sistema

Con el objeto de explicitar los elementos conceptuales del modelo, consideremos a modo de ejemplo una ruta con $n = 3$ (ver esquema (2)). En este caso, el sistema de ecuaciones ordinarias que representa la ruta se escribe como

$$\begin{aligned}
\frac{dS_1}{dt} &= -J_1 + J_e \\
\frac{dS_2}{dt} &= J_1 - J_2 \\
\frac{dS_3}{dt} &= J_2 - J_3 \\
\frac{dS_4}{dt} &= J_3 - J_e,
\end{aligned} \tag{6}$$

donde los J_i ($i = 1, 2, 3$) vienen dados por (4) y J_e por (3). En este punto es importante explicitar que los coeficientes $k_{M,e}$, $k_{cat,e}$, $k_{cat,i}$, $k_{cat,i}$ y k_{M,S_i} fueron elegidos de manera realista

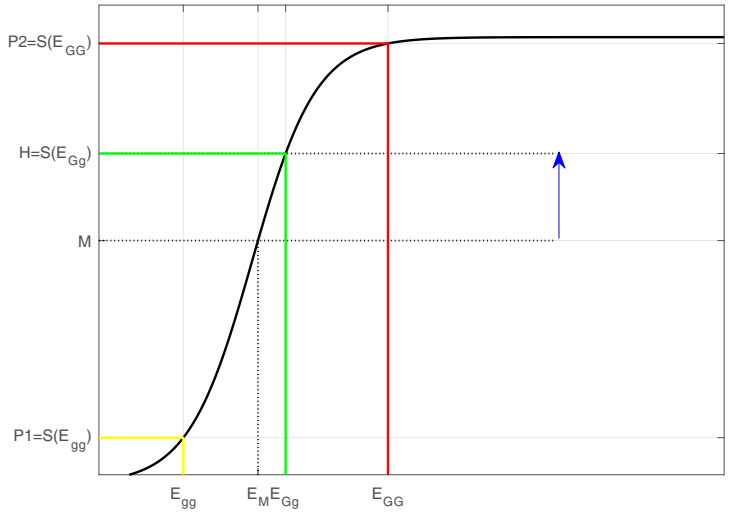


Figura 1: En la figura representamos la concentración del metabolito producto S (calculada numéricamente) del último paso, en función de la concentración enzimática E. La dominancia $d = H - M$, queda representada mediante la flecha azul.

y con el objeto que las unidades de trabajo para S_i, E_i y E_e sean milimolar (mM). Observemos que el sistema de ecuaciones (6), tendrá tantas ecuaciones como metabolitos S_i intervengan en la ruta. En este contexto un estado del sistema estará definido mediante un vector $\mathbf{S} = \langle S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t) \rangle$, solución del sistema (6) [7]. En particular, nos interesa concentrarnos en los estados estacionarios, esto es, los estados para los que $(dS_i/dt) = 0$.

3. Resultados

3.1. Fenotipo, genotipo y modelo matemático

Nuestro modelo representado por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas (SED), nos permite calcular las concentraciones de los metabolitos S_i en estado estacionario en función de la concentración de enzima E_i para cada paso de la ruta. En particular buscamos la relación existente entre las concentraciones de metabolito producto S_{n+1} del ultimo paso con la concentración enzimática E_n. Para simplificar la notación en adelante consideraremos $S_{n+1} \equiv S$ y $E_n \equiv E$. Así mismo, en forma numérica, observamos que las funciones $S(E)$ se tratan de funciones continuas y suaves.

Tal como hemos construimos al modelo, las soluciones del SED depende del entorno a través del flujo externo J_e dada por (3). Con el objeto vincular el fenotipo con el genotipo a través del modelo, hacemos en forma simplificada, la siguiente asociación. El genotipo lo vincularemos con la concentración enzimática E del último paso de la ruta metabólica, dado que esta concentración se puede asociar con la decodificación de la información genética. Por otro lado, el fenotipo lo asociamos con la concentración del metabolito producto S (también del último paso) como se esquematiza en la ruta (2). Esto último tiene que ver con que está concentración es la que se vincula con el valor fenotípico, a modo de ejemplo podemos considerar el color de una flor. Estas asociaciones nos permiten relacionar en forma directa los valores fenotípicos con la información genética. En forma esquemática en la Figura 1 representamos los elementos antes expuestos, y que nos permite relacionar el modelo con dominancia genética d definida mediante la relación (1).

Una forma simple de visualizar la dominancia es a través del modelo de Mather y Jinks (Figura 2), esto es si $H = P_2$ (en valor la progenie coincide con uno de los padres) tenemos que $d = a$, la dominancia es completa. Por otro lado, si $H = M$ (la progenie no se desvía) tenemos que $d = 0$. En este sentido tenemos que $0 \leq d \leq a$, de aquí es que mediante la

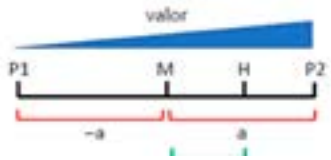


Figura 2: Modelo de Mather y Jinks

relación (5), se puede ver que el grado de dominancia p, varia entre 0 y 1, $p = 0$ significa ausencia de dominancia, y $p = 1$ se corresponde con la dominancia completa.

Como se ha explicitado más arriba, si tenemos presente que $S(E)$, es una función continua y suave, usando el conocido teorema del valor medio en el intervalo $[E_{gg}, E_{GG}]$ (ver Figura 1), tenemos que existe una concentración E_x interior al intervalo $[E_{gg}, E_{GG}]$ donde se cumple que

$$S_2 - S_1 = S'(E_x)(E_{GG} - E_{gg}) \tag{7}$$

Teniendo en cuenta nuestras definiciones y usando (1), tenemos que

$$S'(E_x) = \frac{S_2 - S_1}{E_{GG} - E_{gg}} = \frac{2a}{E_{GG} - E_{gg}} = \frac{2a}{E_{GG} - E_{gg}}. \tag{8}$$

Supongamos ahora que $E_{Aa} \simeq E_x$ y que $E_m \simeq E_x$, podemos realizar la aproximación lineal centrada en E_x, dadas por

$$H = S(E_{Aa}) \simeq S(E_x) + S'(E_x)(E_{Gg} - E_x) = S(E_x) + \frac{2a}{E_{GG} - E_{gg}}(E_{Gg} - E_x) \tag{9}$$

y

$$M = S(E_m) \simeq S(E_x) + S'(E_x)(E_m - E_x) = S(E_x) + \frac{2a}{E_{GG} - E_{gg}}(E_m - E_x). \tag{10}$$

Usando ahora las expresiones (9) y (10), tenemos

$$d = H - M \simeq \frac{2a(E_{Gg} - E_m)}{E_{GG} - E_{gg}} = \frac{2aE_{Gg}(1 - E_m/E_{Gg})}{E_{GG} - E_{gg}} = \frac{a\overbrace{(E_{GG} + E_{gg})}^{2E_{Gg}}}{E_{GG} - E_{gg}}(1 - E_m/E_{Gg}) \tag{11}$$

Otra forma de escribir la relación (11) es teniendo en cuenta que como $E_{Gg} = (E_{GG} + E_{gg})/2$, podemos escribir $E_{GG} - E_{gg} = 2E_{Gg} - 2E_{gg}$. Reemplazando en denominador de (11)

$$d \simeq \frac{2aE_{Gg}}{2E_{Gg} - 2E_{gg}}(1 - E_m/E_{Gg}). \tag{12}$$

Esto resultado también puede reescribirse como

$$d \simeq a\frac{E_{Gg} - E_m}{E_{Gg} - E_{gg}}. \tag{13}$$

Teniendo en cuenta que el grado de dominancia se define como $p = d/a$, y pensando al resultado (13) como una igualdad, tenemos

$$p = \frac{E_{Gg} - E_m}{E_{Gg} - E_{gg}}. \tag{14}$$

Del resultado (14) la concentración de enzima E_m, requerida para manifestar un fenotipo cuyo valor se encuentre en el punto intermedio entre $P_1 = S(E_{gg})$ y $P_2 = S(E_{GG})$ está dada por $E_m = pE_{gg} + (1 - p)E_{Gg}$.

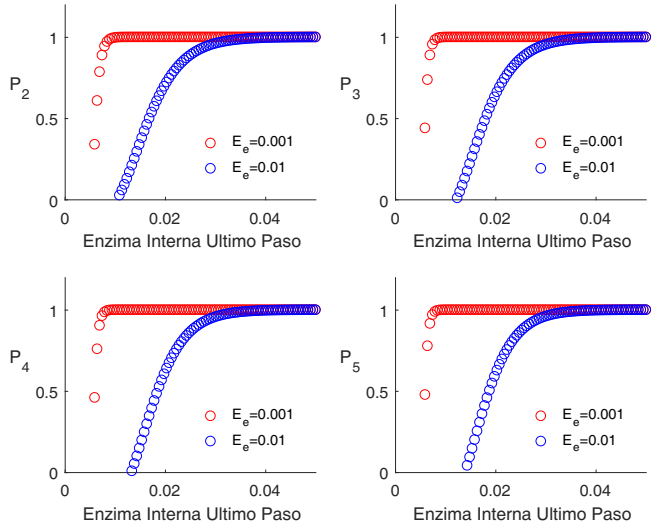


Figura 3: p en función de la enzima del último paso. Cuatro rutas con distintos números de metabolitos, 2, 3, 4 y 5 metabolitos con p_2, p_3, p_4 y p_5 respectivamente.

3.2. Grado de dominancia y entorno

En esta sección presentamos la relación entre el grado de dominancia con el entorno de la ruta metabólica. En este sentido, en el modelo matemático, al entorno lo representamos a través del J_e (como se puede ver en la relación (3)). Con este objetivo en mente, calculamos el valor del grado de dominancia p para distintos valores de la enzima externa E_e. En la figura 3 mostramos los resultados correspondientes a los cálculo de p para dos valores de enzima externa, $E_e = 1 \times 10^{-3} mM$ y $E_e = 10 \times 10^{-3} mM$, considerando cuatro rutas posibles, con dos metabolitos, tres metabolitos, cuatro metabolitos y cinco metabolitos. En nuestra búsqueda elegimos el valor de enzima externa E_e aumentando diez veces su valor, con el objeto de considerar dos entornos contrastantes entre si. Por otra parte, consideramos rutas con diferentes números de metabolitos con la idea de considerar el efecto de pasos previos al metabolito de salida.

Para llevar adelante los cálculos numéricos en la determinación de p, hemos elegido fijar el valor de E_{gg} (extremos inferior del intervalo ver Figura 1) en $5 \times 10^3 mM$ y variar el la longitud del intervalo aumentando E_{GG} hasta $5 \times 10^2 mM$.

4. Discusión y conclusiones

Resulta importante resaltar que en este trabajo nos hemos concentrado en exponer aspectos centrales del modelo matemático, y cómo este se relacionan con el problema que nos interesa abordar. Por razones de espacio no hemos explicitado los aspectos numéricos involucrados en los cálculos realizados.

La Sección 3, está dedicada a la vinculación entre el modelo matemático y nuestro problema de interés. En esta parte del trabajo hemos presentado una relación entre el grado de dominancia p y las concentraciones de enzimas E_m, E_{gg} y E_{Gg} (relación (14)). En este sentido, a través del valor de p, esta relación nos permite conectar aspectos macroscópicos observables (el fenotipo), con aspectos microscópicos asociados a la decodificación genética de las que dependen las concentraciones enzimáticas.

La Sección 4 está dedicada a analizar cómo el entorno de la ruta metabólica impacta sobre la dominancia. Este análisis lo realizamos a través del cálculo de p en diferentes condiciones tanto del entorno como del número de metabolitos de la ruta. Como podemos observar en la Figura 3, el número de metabolitos intervinientes no modifica significativamente el grado de

dominancia. Sin embargo, resulta interesante observar que una ruta acoplada débilmente con el entorno ($E_e = 0.001mM$) alcanza más rápidamente la dominancia completa con el aumento de la concentración de la enzima del último paso.

A modo de perspectiva de este trabajo, estamos estudiando una formulación analítica que reemplace algunas estrategias numéricas usadas hasta ahora.

Referencias

[1] Kearsey MJ and Pooni HS, 1996. The Genetical Analysis of Quantitative Traits. Chapman and Hall, London. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-4441-2.

[2] Kornish-Bowden A., 1984. Enzyme specificity: Its meaning in the general case. J. Theor. Biol. 108:451-457. https://doi.org/10.1016/S0022-5193(84)80045-4.

[3] Kacser H., Burns J.A., 1981. The molecular basis of dominance. Genetics 97: 639–666. https://doi.org/10.1093/genetics/97.3-4.639.

[4] Agutter P.S, 2008. The flux-summation theorem and the 'evolution of dominance'. J Theor Biol. 254:821-825. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.07.027.

[5] de Vienne D., Coton C., Dillmann C., 2023. The genotype-phenotype relationship and evolutionary genetics in the light of the Metabolic Control Analysis. Biosystems. 232:105000. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.105000

[6] Frances C Sussmilch, John J Ross, James B Reid Mendel: From genes to genome Plant Physiol. 2022 Nov 28;190(4):2103-2114. doi: 10.1093/plphys/kiac424.

[7] Aníbal Lodeiro y Augusto Melgarejo, Robustness in Escherichia coli glutamate and glutamine synthesis studied by a kineticmodel. Journal of Biological Physics 34 91-106 (2008).

MONITOREO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO DE LOS INGRESANTES EN LA PRIMERA ASIGNATURA EN CARRERAS DE INGENIERÍA DE LA UNLP

Manceñido, Andrés R., Di Domenicantonio, Rossana

Cátedra de Ingreso, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47, La Plata (B1900TAG), Buenos Aires, Argentina
andres.mancenido@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, los estudiantes que ingresan deben realizar la primera materia del plan de estudios llamada “Matemática para Ingeniería” (MatePi). Esta materia tiene por objetivo principal nivelar los contenidos matemáticos necesarios para realizar luego las materias correlativas del plan de estudios. En la Facultad se piensan, diseñan e implementan estrategias que favorezcan una mayor retención sobre todo en la primera etapa de la carrera que es donde se concentra la mayor tasa de abandono.

Esta materia es común a las trece especialidades que se dictan en esta facultad. Por este motivo es una asignatura con una importante cantidad de alumnos inscriptos y de docentes asignados a su dictado. Las clases se desarrollan habitualmente en forma presencial con metodología de aula taller y los alumnos tienen la posibilidad de promocionar la materia con las evaluaciones parciales. La materia se dicta tres veces al año. La modalidad llamada “Intensiva” es la que se realiza entre Enero y Febrero de cada año, con clases de 4 horas y todos los días de la semana. Luego hay una modalidad trimestral con clases de 2 horas, tres veces por semana y se desarrolla entre marzo y junio. Por último, una modalidad “anticipada” que se realiza de agosto a noviembre, con la misma distribución horaria, donde cursan alumnos que no hayan alcanzado los objetivos en las modalidades anteriores y además la pueden cursar alumnos del último año del colegio secundario.

Los contenidos abordados en la asignatura son en general temas del nivel medio. Se repasan y profundizan conceptos de geometría, de cálculo con los diferentes conjuntos numéricos, ecuaciones y sistemas de ecuaciones, rectas y cónicas en el plano cartesiano como así también trigonometría. Las clases se implementan con una modalidad de trabajo de aula taller donde los alumnos y docentes trabajan colaborativamente y el estudiante es concebido como el protagonista del aprendizaje en el aula. Para poder emplear esta modalidad, se deben dejar de lado algunas costumbres pasivas de estudio que traen los alumnos de la escuela media y eso se lleva a cabo a través de un proceso que lleva tiempo. La metodología de aula taller concibe el aprendizaje como un proceso constructivo interno, donde la interacción social favorece el proceso de aprendizaje. Según Ander-Egg [1] es una metodología participativa ya que todos los talleristas (docentes y estudiantes) deben tener una actitud activa, aspecto central de este modo de trabajo, ya que se enseña y se aprende a través de una experiencia realizada conjuntamente en la que todos los sujetos están involucrados. Para esta metodología es importante disponer de aulas planas con mesas para trabajar en grupo y equipos docentes comprometidos con la metodología ya que son quienes acompañan, guían y originan procesos cognitivos en el aula. Además, detectan las ideas emergentes para generar los debates en el pizarrón y trabajar en forma colaborativa. El estudiante a su vez debe modificar hábitos arraigados como el estudio memorístico y repetitivo e involucrarse activamente en el aula donde tendrá que leer, analizar, interpretar, ejercitar, cuestionarse, consultar, reflexionar y sacar conclusiones.

La materia tiene un libro teórico-práctico [2] especialmente diseñado para los contenidos y la metodología que se lleva a cabo en la materia. Este libro contiene tanto explicaciones como así también ejemplos y problemas de aplicación de las herramientas estudiadas. Las

evaluaciones son diseñadas por la coordinación de la cátedra para todos los estudiantes que cursan la materia en cada instancia.
Entre las estrategias que la Facultad promueve y la materia implementa, podemos mencionar que, durante los segundos cuatrimestres de cada año en la modalidad anticipada antes mencionada, pueden cursar la materia alumnos que estén interesados en carreras de ingeniería y que aún no son alumnos de la institución, mientras cursan el último año del colegio secundario. De este modo los estudiantes del secundario asisten a la Facultad y van conociendo la institución, los docentes universitarios y nivelando los contenidos abordados. La materia la cursan un gran número de estudiantes que se distribuyen en comisiones y en cada una de ellas se asigna un equipo de cuatro docentes, con relaciones promedio de 20 a 30 alumnos por docente, según la modalidad (Tabla 1).
Quienes promocionen la materia con nota final seis o más, quedan liberados de realizar la modalidad intensiva del verano y están en condiciones de iniciar en marzo la materia correlativa a MatePi que se llama Matemática A, donde se estudia el cálculo diferencial en una y varias variables.

Tabla 1: Distribución de alumnos y docentes en los últimos dos años.

Matemática PI	Año 2023			Año 2024		
	Intensiva	1° Trim.	Anticipada	Intensiva	1° Trim.	Anticipada
Cantidad de alumnos	1470	1144	1367	1646	1287	1423
Cantidad de docentes	60	56	60	61	60	58
Cantidad de comisiones	15	14	15	16	15	15

Otras estrategias de retención que se implementan en la materia son la repetición de la cursada tres veces al año, el acompañamiento con entornos virtuales de enseñanza y aprendizaje, el dictado de talleres de técnicas de estudio y el dictado con modalidad a distancia para alumnos que estén haciendo el último año del colegio y residan a más de 60 km de la ciudad de La Plata. Además, en la Facultad se organiza una reunión con Directivos de colegios secundarios y se convoca a los padres de los alumnos ingresantes con el fin que ellos también colaboren en la retención de los estudiantes.
Según Tinto [3] “las universidades deben reconocer que las raíces del desgaste no se encuentran sólo en estudiantes y las situaciones que enfrentan, sino también en el carácter mismo de los entornos educativos”.
Si bien es posible identificar políticas institucionales que promueven el compromiso y la permanencia de los estudiantes, también es cierto que existen los llamados “estudiantes fantasmas” que son denominados así por algunos autores como Legendre [4] por ser visibles administrativamente, pero invisibles en lo pedagógico, o los estudiantes de paso, que serían los ingresantes indecisos, que ensayan la experiencia universitaria. A su vez en el inicio de las carreras universitarias es frecuente escuchar que no saben para qué sirven los contenidos de las materias iniciales. El saber es valorado en función de su aplicación inmediata en acciones situadas y problemas contextualizados y no es siempre factible poder motivarlos matemáticamente. Por ello, consideramos importante las acciones que la institución implementa.

DESARROLLO

En este trabajo se realizó un monitoreo mediante un análisis cuantitativo de los alumnos que realizaron la modalidad intensiva del verano 2024 y de la modalidad anticipada 2023 según el rendimiento académico y el tipo de estudiante (Tabla 2). En este caso se ha diferenciado a los alumnos dependiendo de la cohorte a la que pertenecían y si habían cursado o no la modalidad anticipada, obteniendo algunos patrones de interés académico. También se realizó un análisis cuantitativo similar para aquellos alumnos que cursaron la modalidad intensiva del verano 2023 y la anticipada 2022 (Tabla 3) y se los comparó con los anteriores, para evaluar si los patrones se mantienen y redactar conclusiones.
En ambas tablas (Tabla 2 y Tabla 3) la categoría “Promocionó” incluye a todos los alumnos que aprobaron ambos parciales con nota mayor o igual a 4 y con promedio entre ellos mayor o igual a 6. La categoría “Desaprobó” incluye aquellos alumnos que agotaron todas las

instancias de evaluación disponibles, pero no alcanzaron las condiciones para promocionar la materia. La categoría “Abandonó” incluye aquellos alumnos que desaprobaron la materia, pero no agotaron todas las instancias de evaluación que tenían disponibles. Y por último la categoría “Libre” incluye aquellos alumnos que no rindieron ninguna evaluación (ya sea por no haber venido nunca a clase, o haber venido a las primeras clases, pero no presentarse nunca a una evaluación).

Tabla 2: Rendimiento académico en la modalidad intensiva 2024 y anticipada 2023

Resultado	Intensiva 2024					Anticipada 2023		
	TOTAL	Intensiva 1° vez	Intensiva y Anticipada (sec.)	Intensiva y Anticipada (rec.)	Intensiva recursantes sin anticipada	TOTAL	Secundario	Recursantes
Promocionó	494	382	86	24	2	350	263	87
Desaprobó	314	252	30	31	1	173	69	104
Abandonó	447	384	31	28	4	414	200	214
Libre	391	276	26	63	26	430	216	214
Total	1646	1294	173	146	33	1367	748	619

Con los alumnos de la intensiva 2024 (Tabla 2) hemos realizado la siguiente clasificación:
- “Intensiva 1º vez”: Aquellos alumnos ingresantes de la cohorte 2024 que realizaron la materia por primera vez en la modalidad intensiva del verano 2024.
- “Intensiva y Anticipada (sec.)”: Aquellos alumnos ingresantes de la cohorte 2024 que siendo alumnos del secundario realizaron la modalidad anticipada 2023 y luego la modalidad intensiva del verano 2024.
- “Intensiva y Anticipada (rec.)”: Aquellos alumnos de cohortes anteriores que realizaron la modalidad anticipada 2023 y la modalidad intensiva del verano 2024.
- “Intensiva recursantes sin anticipada”: Aquellos alumnos de cohortes anteriores que realizaron la modalidad intensiva del verano 2024, pero no la modalidad anticipada 2023 (pero si alguna modalidad anterior).

Si analizamos también los alumnos que realizaron la modalidad anticipada 2023 las categorías según la clasificación realizada son:
- “Secundario”: Aquellos alumnos de la cohorte 2024 que hicieron la modalidad anticipada (sin ser alumnos de la Facultad todavía).
- “Recursantes”: Aquellos alumnos de cohortes anteriores que realizaron la modalidad anticipada.

De forma análoga, la Tabla 3 muestra los mismos datos, pero correspondientes a las modalidades intensivas 2023 y anticipada 2022.

Tabla 3: Rendimiento académico en la modalidad intensiva 2023 y anticipada 2022

Resultado	Intensiva 2023					Anticipada 2022		
	TOTAL	Intensiva 1° vez	Intensiva y Anticipada (sec.)	Intensiva y Anticipada (rec.)	Intensiva recursantes sin anticipada	TOTAL	Secundario	Recursantes
Promocionó	485	322	107	47	9	363	264	99
Desaprobó	254	208	29	16	1	179	76	103
Abandonó	417	342	33	27	15	306	165	141
Libre	314	211	21	63	19	400	212	188
Total	1470	1083	190	153	44	1248	717	531

RESULTADOS

Si analizamos comparativamente los resultados obtenidos durante el curso intensivo del verano 2024 de las 1646 inscripciones entre todas las comisiones se observa una distribución según el rendimiento académico como se muestra en la Figura 1 donde el 30%

de los estudiantes promocionaron la materia. Se puede ver también que durante el curso intensivo del verano 2023 la distribución fue similar a la anterior, con un 33% de promocionados de los 1470 inscriptos a la materia.
Se observa también que en ambas modalidades sólo la mitad de los alumnos inscriptos llegaron a completar todas las instancias de evaluación disponibles (aunque puede que varios de los que abandonaron haya sido después de rendir el segundo parcial, con lo cual hayan visto todos los temas de la materia). Si se compara esta distribución con el rendimiento de los estudiantes durante la modalidad anticipada 2023 (Tabla 1) y se calculan los porcentajes, se observa que en esa ocasión menos del 40% de los alumnos completaron todas las instancias de evaluación y el porcentaje de aprobación fue menor (25.6%). Si se realiza el mismo análisis con los datos de la modalidad anticipada 2022 (Tabla 2) se observa una tendencia similar, con alrededor de 43% de alumnos que completaron todas las instancias y con un 29% de aprobación.

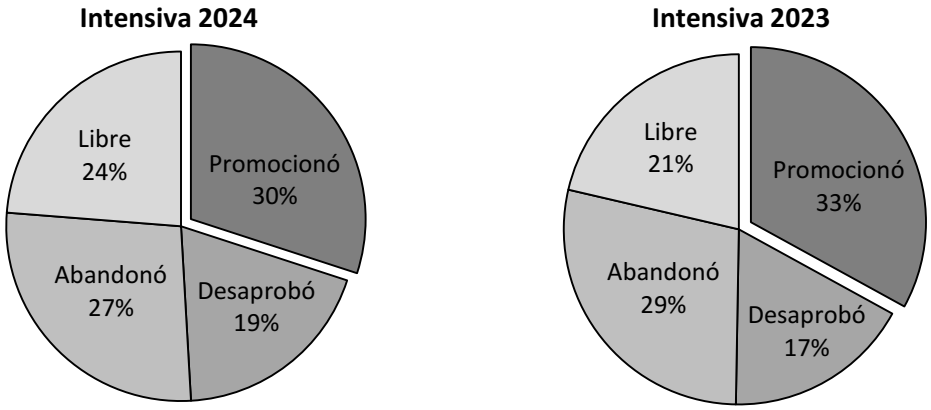


Figura 1: Rendimiento académico general en la modalidad intensiva 2024 e intensiva 2023.

Si ahora analizamos la cohorte 2024, podemos observar que aquellos alumnos que realizaron la materia por primera vez durante la intensiva (Figura 2) presentan una distribución muy similar a la media para dicho curso. Sin embargo, se observa un marcado aumento en el porcentaje de promocionados para los alumnos que realizaron la modalidad anticipada además de la intensiva (dos veces la asignatura de manera continuada), en detrimento del porcentaje de abandono y libre (Figura 2). Esta misma tendencia se observó el año anterior, de forma incluso más marcada, con los ingresantes de la cohorte 2023 durante la modalidad intensiva de dicho año (Figura 3), en dónde los ingresantes que realizaron la modalidad intensiva por primera vez presentaron un 30% de promocionados (similar al 33% de promocionados totales), mientras que los que realizaron la modalidad anticipada además de la modalidad intensiva del verano presentaron un 56% de promocionados.

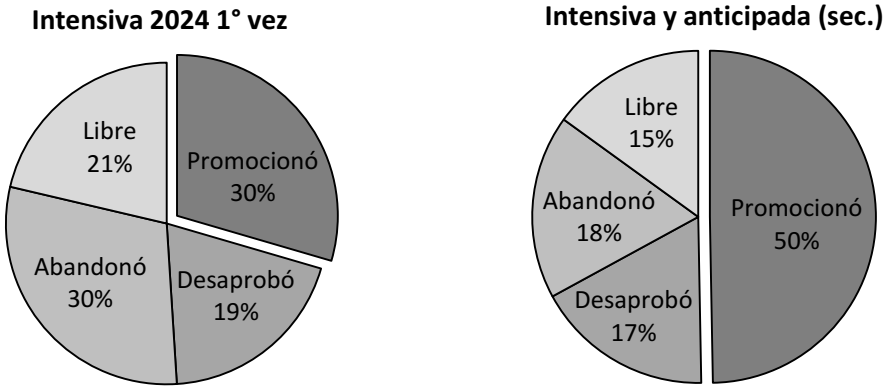


Figura 2: Rendimiento académico de ingresantes 2024 en modalidad intensiva 2024 que realizaron el curso por primera vez y aquellos realizaron además la anticipada 2023.

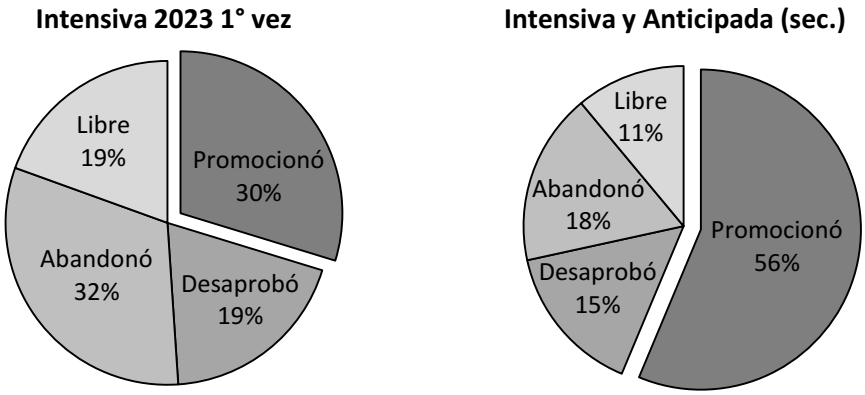


Figura 3: Rendimiento académico de ingresantes 2023 en modalidad intensiva 2023 que realizaron el curso por primera vez y aquellos realizaron además la anticipada 2022.

Si se comparan ahora los resultados de los alumnos de cohortes anteriores se observa que aquellos recursantes que hicieron la anticipada y la intensiva (además de alguna otra modalidad anterior) presentan un porcentaje de promocionados bastante inferior a la media y un marcado aumento en el porcentaje de libres comparado con la media. En la intensiva del verano 2023 el porcentaje de promocionados de esta categoría era similar a la media, pero en la intensiva del verano 2024 los ingresantes anteriores a 2024 tuvieron una modalidad especial de cursada virtual con evaluaciones presenciales, lo cual explica la diferencia. Los recursantes que no tuvieron continuidad en los cursos, y no realizaron la modalidad anticipada muestran un porcentaje de promocionados inferior a la media y un marcado aumento de alumnos libres. De todas formas, son muy pocos los estudiantes que estaban en esta categoría (sólo 33 en 2024) y además al tratarse de una modalidad virtual con exámenes presenciales, es más entendible esa distribución.

CONCLUSIONES

Según Walker [5], la transición a la vida universitaria es un proceso que supone desafíos con un campo disciplinar específico, en este caso la matemática, y una cultura institucional nueva que requiere la apropiación de costumbres, saberes, y lenguajes propios, tarea nada sencilla para los alumnos que inician su rol de estudiantes universitarios. Es por ello que promover estrategias de retención con los ingresantes fortalece el proceso de transición entre los niveles educativos.

Tinto [3] sostiene que existen cinco condiciones que promueven la persistencia de los estudiantes en las universidades, quien las define como “expectativas, apoyo, retroalimentación, participación y aprendizaje”. También el autor sostiene que cuando los estudiantes estudian y aprenden juntos, eso los hace reflexionar y hacerse responsables de su propio aprendizaje y del de sus compañeros.

En los casos relatados y analizados en este trabajo se observa que aquellos alumnos que hacen la materia más de una vez y tienen continuidad en la misma, presentan una mejora en el rendimiento académico, siendo notable en aquellos alumnos nuevos (de colegios secundarios) que hicieron la materia en la modalidad anticipada y la intensiva del verano. Esto muestra la importancia de la estrategia de mantener la modalidad anticipada, no sólo por la cantidad de alumnos que aprobaron en dicha instancia, sino también porque aquellos alumnos que no la aprobaron en esa modalidad estuvieron mejor preparados y tuvieron un rendimiento notablemente mejor en la intensiva del verano. También es notorio que la comparación del rendimiento académico con cohortes anteriores ratifica la importancia de mantener y optimizar las estrategias de retención en ingresantes de nuestra institución.

El acompañamiento de las trayectorias educativas iniciales y la manera en que se organizan los procesos de enseñanza y aprendizaje en el inicio de las carreras universitarias pueden jugar un rol fundamental en el inicio de sus estudios en especial cuando los ingresantes no cuentan con una preparación académica adecuada, es por ello que la materia sostiene la cursada de manera continuada en el año, una intensiva y dos trimestrales, siendo la única

materia de nuestra institución que se dicta tres veces al año, considerando la importancia de nivelar los contenidos matemáticos en los ingresantes a carreras de Ingeniería.
De alguna manera esta situación observada puede responder a que los estudiantes de colegios secundarios llegan a la universidad con un perfil muy heterogéneo en cuanto a su preparación matemática y hacer de manera continuada la materia facilita el tránsito entre niveles educativos, además de promover la apropiación y nivelación de los conceptos que pudieran adolecer. Esta observación concuerda con los datos arrojados por las últimas pruebas PISA [6] (Programa para la evaluación internacional de estudiantes) que se dieron a conocer a fines de 2023 y arrojaron que siete de cada diez estudiantes argentinos no alcanzan los saberes mínimos de matemática mientras que en lectura y ciencia no lo hacen cinco de cada diez. Estas dificultades y falencias se replican en cierta medida en el ingreso de la Facultad. Además, se ha detectado una importante cantidad de alumnos que abandonan o desaprueban entre aquellos que realizan la materia por primera vez en la modalidad intensiva. Esta situación puede estar ligada a que últimamente los ingresantes llegan con pocos hábitos de estudio, pocas habilidades para desenvolverse en un contexto nuevo y poca tolerancia al fracaso. También se detecta una menor calidad en su formación educativa en general, con un escaso nivel de comprensión lectora, poca habilidad de organización de sus tiempos, pocas competencias comunicativas y escaso grado de compromiso con la materia. Estas características están siendo más habituales año a año y por ello en nuestra institución nos esforzamos para minimizarlas.

REFERENCIAS

[1] Ander-Egg, E. (1991). *El taller: una alternativa de renovación pedagógica.* Editorial Magisterio del Río de La Plata. Buenos Aires, 10-19.

[2] Di Domenicantonio, R.; Lubomirsky, N.; Rivera, A. L. (2019). *Matemática inicial para Ingeniería*, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). Rescatado de: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87844

[3] Tinto, V. (2003). Promoting Student Retention Through Classroom Practice. *Enhancing Student Retention: Using International Policy and Practice, Amsterdam*. Rescatado de: https://www.researchgate.net/publication/255589128_Promoting_Student_Retention_Through_Classroom_Practice

[4] Legendre, F. (2003). Les étudiants fantomes. Les sorties précoces de l'université Paris 8. *Revue Carrefours de l'education,* 16, 32-55. Rescatado de: https://www.cairn.info/revue-carrefours-de-l-education-2003-2-page-32.htm

[5] Walker, V. S. (2012). *El tránsito de los estudiantes por la universidad*. Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net. Rescatado de: https://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2012/10/index.htm

[6] Ministerio de Educación de la Nación Argentina (2023). *Argentina en PISA digital 2022: informe de resultados*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Rescatado de: https://www.argentina.gob.ar/educacion/evaluacion-e-informacion-educativa/resultados

GEOGEBRA, UNA HERRAMIENTA A MEDIDA PARA DEMOSTRACIONES EN FÍSICA I

Devece, Eugenio[1]; Costa, Viviana[1] ; Uriona Hugo[1] ; Sejas, Juan[2]

[1]Unidad de Investigación IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
[2]Ayudante Alumno - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
eugenio.devece@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

A modo de experiencia piloto, en un grupo de Física I, se ha incorporado el uso de herramientas de simulación, como GeoGebra para abordar temáticas específicas como por ejemplo los de producto vectorial, estado dinámico de los cuerpos, tensiones sobre una cuerda, etc.

El uso de GeoGebra, en este contexto, se destaca como una herramienta pedagógica innovadora, al transformar conceptos abstractos en representaciones visuales interactivas que los estudiantes pueden explorar y manipular directamente. A través de la modificación de parámetros y la observación en tiempo real de sus efectos, los alumnos logran construir una comprensión más clara y profunda de los fenómenos físicos.

En los cursos de Física I, dentro de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, los contenidos de las clases teórico-prácticas se estructuran utilizando distintos tipos de demostraciones y simulaciones diseñadas para facilitar la visualización de fenómenos complejos [1-2-3-4-5].
.
Dada la naturaleza abstracta de muchos de estos conceptos, la percepción y comprensión por parte de los estudiantes pueden resultar desafiantes. En el Grupo de trabajo, se ha incorporado el uso de herramientas de simulación, como GeoGebra para abordar temáticas específicas como por ejemplo los de producto vectorial, estado dinámico de los cuerpos, tensiones sobre una cuerdas, etc.

GeoGebra es un software de matemática dinámica, que ofrece un entorno en 2D y 3D [6-7], posible de utilizar en todos los niveles educativos. Reúne: geometría, álgebra, hojas de cálculo, gráficas, estadísticas y cálculo en un solo entorno. Además, ofrece una plataforma en línea con más de un millón de recursos gratuitos para el aula creados por la comunidad, que se pueden compartir fácilmente a través de la plataforma. Como dato interesante, para este trabajo, es que GeoGebra, es una potente herramienta de simulación de procesos, con una interfaz intuitiva y ágil, que permite crear recursos de aprendizaje para la elaboración de simuladores, pues dispone de comandos, como son los “deslizadores” y de varias otras funcionalidades dinámicas, entre estas los “comandos” y “guiones”.

El uso de GeoGebra, en este contexto, se destaca como una herramienta pedagógica innovadora, al transformar conceptos abstractos en representaciones visuales interactivas que los estudiantes pueden explorar y manipular directamente. A través de la modificación de parámetros y la observación en tiempo real de sus efectos, los alumnos logran construir una comprensión más clara y profunda de los fenómenos físicos. Este enfoque facilita no solo la transmisión de información, sino también la participación activa de los alumnos, quienes al interactuar con las simulaciones identifican patrones y principios subyacentes de manera intuitiva. El presente trabajo se puede desarrollar a través de tres ejes:

- Ventaja pedagógica y adaptabilidad: Una de las principales ventajas de trabajar con GeoGebra, es su capacidad de adaptación a distintas metodologías de enseñanza de estilos de aprendizaje. Esto permite una enseñanza más colaborativa, práctica y accesible, ya que su carácter gratuito y multiplataforma posibilita su implementación

tanto en entornos presenciales como virtuales. Asimismo, fomenta el aprendizaje autónomo, ya que los estudiantes pueden practicar fuera del aula y explorar los conceptos a su propio ritmo. Además, el uso de GeoGebra promueve la comparación entre resultados obtenidos en experimentos tradicionales y simulaciones digitales. Esta comparación no solo refuerza el aprendizaje, sino que también permite a los estudiantes evaluar la consistencia de los datos y observar el impacto de variables que no son manipulables en experimentos físicos convencionales.

- Impacto en el ámbito de la ingeniería: En el ámbito de la ingeniería, las simulaciones informáticas representan un puente entre el desarrollo teórico y la implementación práctica. También, validar cálculos preliminares antes de proceder al desarrollo físico del proyecto, reduciendo significativamente el riesgo de errores y el costo asociado a una implementación incorrecta. GeoGebra, no solo enriquece el aprendizaje académico, sino que también introduce a los estudiantes a prácticas profesionales que fomenten la eficiencia y la precisión.

- Proyección y comunidad educativa: Más allá de su impacto en el aula, el uso de GeoGebra puede inspirar a los alumnos a desarrollar sus propias herramientas interactivas basadas en los conocimientos adquiridos en los cursos de matemática y física. Esto tiene el potencial de generar una comunidad activa de alumnos y docentes que contribuyan a la creación de nuevos recursos educativos, ampliando la base de conocimiento y beneficiando a generaciones futuras de estudiantes y docentes en diversos niveles educativos.

En conclusión: esta herramienta, al fomentar la creatividad y la colaboración, se posiciona como un recurso clave en la construcción de un aprendizaje significativo y sostenible

DESARROLLO

En el curso de Física I se ha implementado este software con varios propósitos en beneficio del alumnado. Sin embargo, el desarrollo de un applet debe ser organizado por el equipo docente de la comisión, por lo que debajo se detalla una serie de pasos que se siguieron a la hora de construir uno de ellos, para un ejercicio en específico.

Los pasos fueron los siguientes.

1. Selección

El equipo docente se reunió para seleccionar uno o dos ejercicios de cada guía que posean las características que permitan desarrollarlos dentro de la plataforma, como el ejemplo de la Figura 1. De esta manera, se pueden proponer ideas y, a su vez, analizar todas las ventajas y desventajas a la hora de construir la simulación.

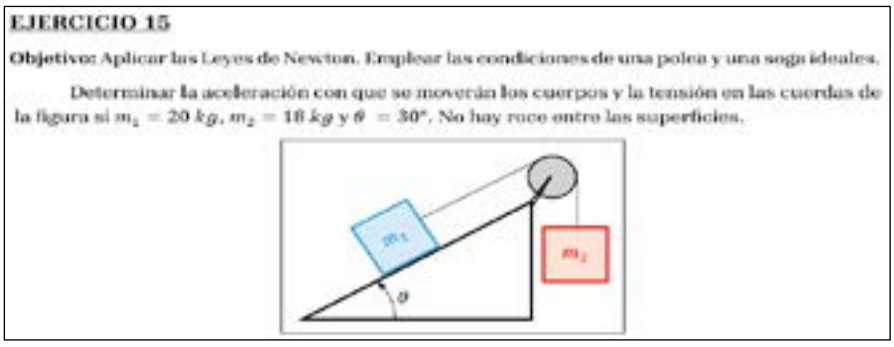


Figura 1. Enunciado de un ejercicio seleccionado.

2. Boceto

Como todo proceso de construcción, se comenzó a partir de un boceto. Esto sirve como una representación visual, da forma a la idea, facilita la transmisión de conceptos, ayuda a detectar

errores o mejoras, y permite probar diferentes diseños y soluciones. Los docentes optan por la versión más eficaz.

3. Resolución analítica

Se realizaron cálculos previos utilizando las leyes de Newton para determinar la aceleración en función de las masas de los bloques y el ángulo de inclinación. Luego, se utilizaron ecuaciones de cinemática para obtener una expresión de la posición de los bloques en función del tiempo, cuyos parámetros se definirán más adelante.

4. Construcción en GeoGebra

A continuación, se describe la construcción del applet en GeoGebra, siguiendo un enfoque basado en vectores, pero implementado a través de puntos en la herramienta.

***4.1**. Definición de las variables*

Para iniciar, se establecieron los valores de las masas 1 y 2, la gravedad, el ángulo de inclinación y el tiempo como deslizadores, como se visualiza en la Figura 2. Los deslizadores otorgan la posibilidad de modificar los valores de los parámetros simplemente deslizando un pin, y tienen la opción de cambiar sus propiedades, como los extremos del intervalo, el paso, la visibilidad, el tamaño, el color, las secuencias de comandos, etc.

Luego, se escribió la aceleración en términos de los parámetros mencionados, por lo que su valor va a cambiar al utilizar los deslizadores. Sin embargo, en el apartado de las secuencias de comandos para cada deslizador se estableció que, al modificar algún parámetro, el tiempo "T" se ajuste y fije automáticamente en 0, esto sirve para no generar interferencias durante la simulación.

***4.2**. Plano inclinado*

El plano inclinado fue desarrollado mediante puntos conectados con la función "Polígono" de la sección "Herramientas". Esta función permite conectar puntos y rellenar con color el área encerrada. Para ello, se establecieron dos puntos fijos "A" y "B", y dos puntos de posición variable "C" y "D". Los puntos fijos actúan como referencia, mientras que las variables se ajustan dinámicamente en función del parámetro "α" (en grados), simplemente utilizando conceptos de vectores donde se da un módulo y una dirección, percibido en la sección "Álgebra" de la Figura 2.

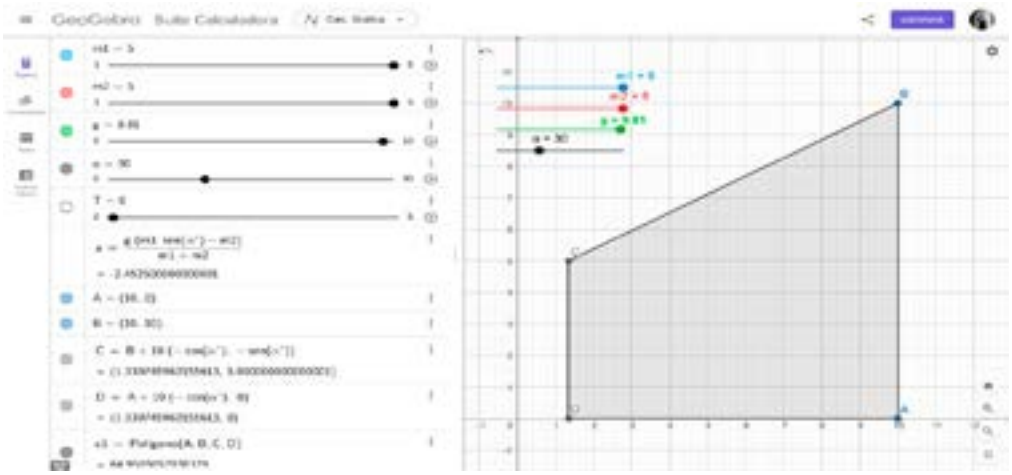


Figura 2. Construcción del plano inclinado.

***4.3.** Polea*

Tomando como referencia al punto "B", se ubicó el punto "E" a una distancia e inclinación acordes para no superponer los gráficos. La inclinación está desfasada con respecto al plano. Luego, utilizando "Circunferencia: centro y radio", de la sección "Herramientas", se colocó la misma con centro en "E" y un radio determinado. Tanto la distancia entre "B" y "E" como el radio de la polea pueden modificarse en cualquier momento del desarrollo, por lo que no es esencial dar valores precisos al inicio.

Para la sensación de rotación de este objeto, se agregaron paletas mediante segmentos unidos entre el punto "E" y puntos desfasados a 45° entre sí, que varían su posición

cambiando su dirección con la ecuación de cinemática rotacional dentro de cada argumento, como se puede apreciar en la Figura 3.

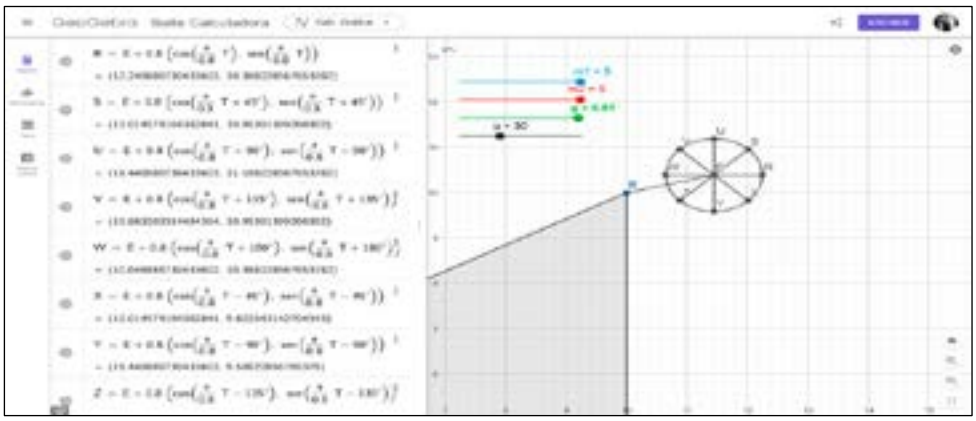


Figura 3. Construcción de la polea.

4.4. *Bloque 1*

El bloque 1 fue construido de la misma manera en la que se construyó el plano. La diferencia entre ambos se encuentra en la movilidad, ya que el bloque debe desplazarse a través de la plataforma cumpliendo con las leyes de Newton. Tomando como referencia al punto “B”, se ubicó al punto “F” con distancia variable (utilizando las ecuaciones de cinemática) y misma dirección hacia “C”.

La cuerda que une este bloque con la periferia de la polea está formada por un segmento. Primero, se trazó una línea recta “j” (como guía) perpendicular a la arista “h” del bloque y unida a un punto “J” de la circunferencia (que es perpendicular a la normal del plano inclinado, así la cuerda está colocada como indica la figura, paralela al plano). Luego, se colocó el punto “K” que interseca la recta y el bloque, lo que permite finalmente dibujar el segmento entre “J” y “K”. Para visibilizar únicamente la cuerda, se ocultó la línea recta punteada, como se muestra en la Figura 4.

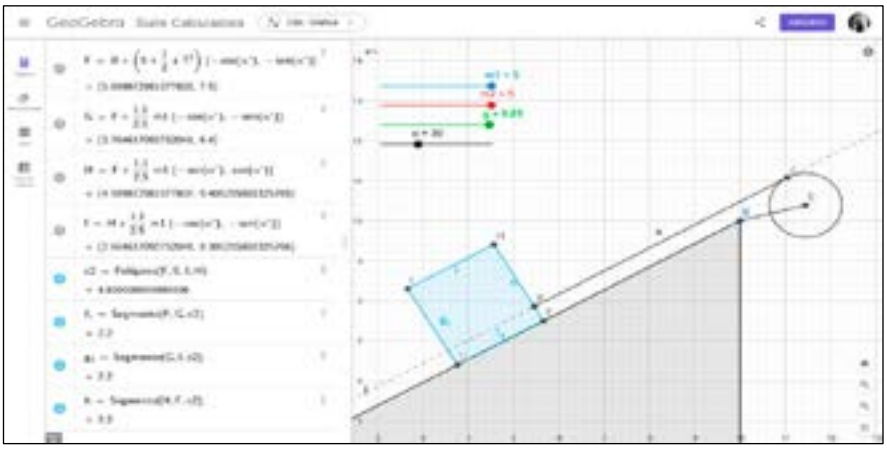


Figura 4. Construcción del bloque 1

4.5*. Bloque 2*

El bloque 2 se diseñó de una manera más sencilla que el bloque anterior. Se colocó un punto “L” desplazado de forma horizontal con respecto a “E”, luego un punto “M” desplazado de forma vertical con respecto a “L”. El punto “M” varía su posición siguiendo las ecuaciones de cinemática, y se lo utiliza como referencia para el resto de puntos y así formar el polígono que representa al bloque, como se puede notar en la Figura 5.

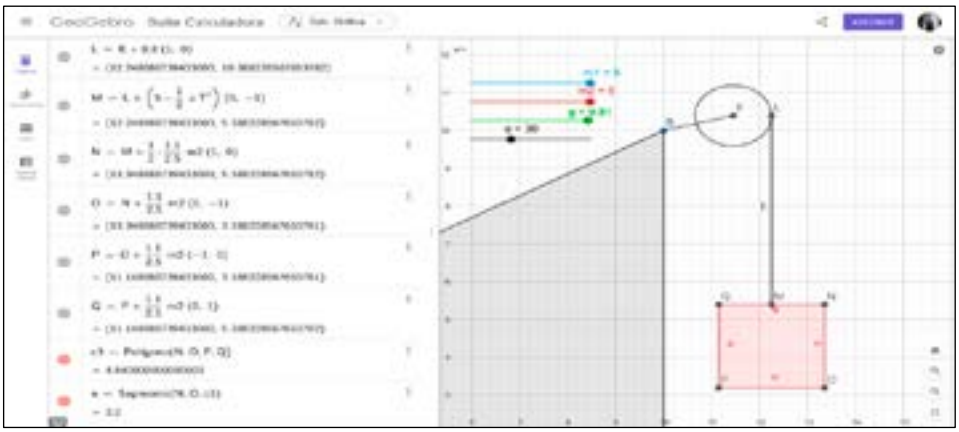


Figura 5. Construcción del bloque 2.

***4.6**. Presentación*

Para facilitar la interacción y mejorar la simulación, se añadieron distintas herramientas, como los deslizadores, los botones y los textos con posiciones determinadas y ordenadas, como se muestra en la Figura 6.

La función de los botones es la de aplicar comandos que son ejecutados por medio de un lenguaje de programación propio de GeoGebra. En este caso, su utilidad es la de fijar los deslizadores en un determinado valor, como el tiempo, la gravedad y el ángulo de inclinación.

La función de los textos es la de informar al usuario, ya sea el valor de un parámetro o simplemente una señalización. Para evitar que los bloques crucen los límites del plano (para que el bloque 1 no realice trayectorias no previstas y el bloque 2 no traspase el suelo), se utilizaron secuencias de comando. Las secuencias de comando tienen la función de realizar acciones determinadas.

En este caso, si la posición de uno de los vértices de los bloques tiene una distancia menor a un valor pequeño con respecto a los puntos límites de la estructura (extremo inferior del plano inclinado y el suelo), el tiempo “T” se detiene.

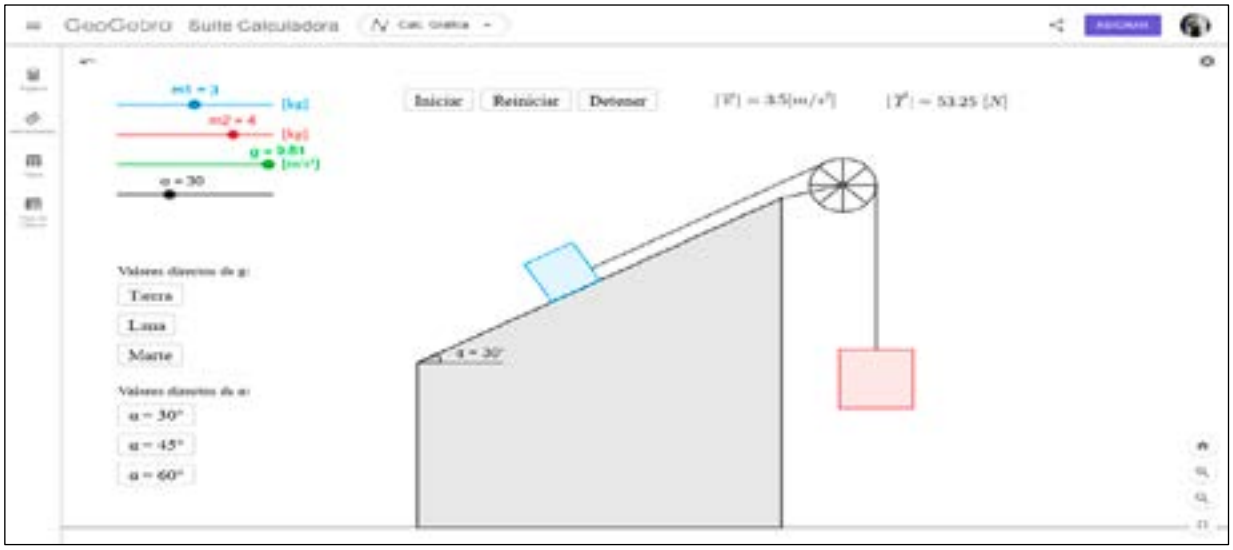


Figura 6. Presentación del applet.

CONCLUSIONES

La implementación de GeoGebra en el curso de Física I ha demostrado ser una estrategia pedagógica efectiva para mejorar la comprensión de conceptos abstractos a través de simulaciones interactivas. La experiencia piloto ha permitido a los estudiantes explorar de manera dinámica fenómenos físicos complejos, favoreciendo un aprendizaje más significativo y autónomo.

Desde el punto de vista didáctico, el uso de esta herramienta ha facilitado la visualización de principios físicos fundamentales, permitiendo a los alumnos contrastar resultados analíticos con simulaciones y desarrollar habilidades esenciales para su formación en ingeniería. Asimismo, la adaptabilidad de GeoGebra a distintos entornos de enseñanza y su carácter accesible lo posicionan como un recurso valioso para la educación en ciencias.

Además, esta iniciativa ha abierto la puerta a nuevas posibilidades de integración de herramientas digitales en la enseñanza, promoviendo la creación de una comunidad de aprendizaje en la que docentes y estudiantes colaboran en el desarrollo de simulaciones y recursos interactivos. A partir de los resultados obtenidos, se plantea la posibilidad de expandir el uso de GeoGebra en otras áreas de la física y en cursos superiores, con el objetivo de seguir optimizando el proceso de enseñanza y aprendizaje en la Facultad de Ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Tipler, P., y Mosca, G. (2016). *Física para la Ciencia y la Tecnología*, Volumen 1 (6ª edición). Reverté, Barcelona.

[2] Serway, R. A., & Jewett, J. W. Jr. (2016). *Física I* (7ª edición). Thomson, México.

[3] Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. (1993). *Física*, Volumen 1 (6ª edición). C.E.C.S.A., México.

[4] Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2016). *Fundamentos de Física* (9ª edición).

[5] Serway, R. A. (2014). *Física*, Volumen I (6ª edición). McGraw-Hill, México.

[6] Hohenwarter, M., Preiner, J., & Yi, T. (2007, julio). *Incorporating GeoGebra into teaching mathematics at the college level*. En *Proceedings of the International Conference for Technology in Collegiate Mathematics 2007*.

[7] Velikova, E., Mierlus-Mazilu, I., Vasileva-Ivanova, R., & Georgieva, D. (2018). *About STEM Education*. *Proceedings of University of Ruse, 57*, 10-14.

MANOS A LA OBRA, ALUMNOS ARMANDO DISPOSITIVOS PARA REALIZAR UN LABORATORIO

Devece, Eugenio[1]; Costa, Viviana[1]; Porcel de Peralta, Benjamín[1]; Bayés, Agustina[1]; Gallo, Marina[2]

[1] UIDET IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina

[2] Alumna de la Facultad de Ingeniería, Becaria de IMApEC, Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina

eugenio.devece@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se basa en las actividades de extensión desarrolladas en el marco de la UIDET IMApEC (Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias), a través de visitas de estudiantes de nivel secundario a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y de la participación del equipo extensionista en establecimientos educativos de la ciudad.

Para el desarrollo de estas actividades, se emplean tanto dispositivos tradicionales como tecnologías de la información y la comunicación (TIC). La incorporación de herramientas tecnológicas resulta especialmente motivadora para los estudiantes, ya que fomenta su participación activa en las experiencias propuestas y facilita la interacción con el equipo extensionista, tanto antes como durante el desarrollo de las actividades.

En el Departamento de Ciencias Básicas, y particularmente dentro de nuestro grupo de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, la extensión universitaria desempeña un rol fundamental. Esta labor permite acercar el conocimiento científico a la comunidad, fortalecer los vínculos entre la universidad y los distintos niveles educativos, y generar espacios de aprendizaje significativos. En este contexto, el presente trabajo propone nuevas estrategias basadas en experiencias previas llevadas a cabo por la UIDET, incluyendo visitas a instituciones de nivel secundario, recorridos de estudiantes por nuestra unidad académica y el uso de plataformas virtuales para la enseñanza de conceptos científicos.

Uno de los desafíos recurrentes en la enseñanza de las ciencias es el bajo interés de los estudiantes en carreras vinculadas a la ingeniería y otras disciplinas científicas [1]-[3], (Jacinto C, Terigi F. (2007), (J.A. Acevedo Díaz. (2004), M. B. Roble, P. Roux, J. Cornejo (2015). Para contribuir a revertir esta tendencia, desde nuestra UIDET se promueve el desarrollo de actividades prácticas que permitan a los alumnos aplicar el método científico en situaciones de la vida cotidiana. A través de experimentos guiados y el uso de herramientas virtuales, los estudiantes pueden visualizar fenómenos físicos y comprender la relevancia de los contenidos que estudian en sus cursos.

En este sentido, la extensión universitaria cumple un papel clave al acercar la ciencia y la tecnología a los jóvenes, brindándoles experiencias concretas que despierten su curiosidad y vocación. La posibilidad de participar en experimentos de laboratorio, manipular dispositivos y analizar resultados no solo fortalece su comprensión de los conceptos científicos, sino que también los motiva a considerar la ingeniería y otras ciencias como opciones viables para su futuro académico y profesional.

La propuesta presentada en este trabajo consiste en una actividad experimental adaptable tanto al ámbito universitario como a establecimientos de nivel secundario o técnico. Su objetivo es que los estudiantes investiguen bibliografía relevante, seleccionen materiales y construyan dispositivos experimentales que les permitan abordar los contenidos académicos desde una perspectiva más práctica.

La selección de los temas a trabajar se realiza en conjunto con los docentes responsables de cada grupo de estudiantes. Algunos ejemplos incluyen el péndulo, la cinemática y la flotación, entre otros, los cuales presentan la ventaja de que sus resultados pueden ser validados dentro del margen de incertidumbre correspondiente [4] E. Devece M. Tejerina, G. M. J. Fernández Lobo, M. Gamba, P. Pesco, S. Conconi, C. Del Río Pauletti, M. A. Bolino, (2021).

Finalmente, estas actividades se diseñan tomando como base experiencias previas y los resultados de encuestas aplicadas a los estudiantes participantes, con el fin de mejorar continuamente la propuesta y asegurar su impacto positivo en el aprendizaje.

ANTECEDENTES

En el contexto de la virtualidad, la UIDET llevó a cabo diversas actividades de extensión organizadas de la siguiente manera. Se realizaron encuentros a través de Zoom con los docentes responsables de los grupos participantes, principalmente profesores de física de nivel secundario. Durante estas reuniones, se planificaron las actividades considerando los contenidos disciplinares abordados y las características de los estudiantes. Además, se compartieron consignas detalladas que incluían enlaces a páginas web con material complementario y experiencias previas. En general, los temas tratados estuvieron relacionados con las leyes de Newton.

El procedimiento consistió en establecer contacto con el cuerpo docente encargado de la actividad, proporcionarles una guía detallada y material audiovisual con ejemplos para que los alumnos pudieran explorar distintas formas de desarrollar el trabajo. Posteriormente, los estudiantes realizaron la experiencia en clase y compararon sus resultados con los obtenidos en las referencias proporcionadas.

Asimismo, se llevaron a cabo actividades de extensión en modalidad presencial, tanto en un colegio secundario como en espacios áulicos de nuestra facultad, como se muestra en la Figura 1. Al finalizar estas experiencias, se aplicaron encuestas a los estudiantes participantes, cuyos resultados sirvieron como insumo para mejorar futuras propuestas. Los datos obtenidos a partir de estas encuestas se presentan en el siguiente apartado.



Figura 1: Grupo de estudiantes de nivel secundario participantes de la experiencia en la Facultad de Ingeniería.

ENCUESTA

Como parte de las experiencias desarrolladas en el año 2024, se realizaron encuestas a los estudiantes participantes al finalizar las actividades. El objetivo de estas encuestas fue recopilar sus percepciones sobre la propuesta implementada, con el fin de identificar aspectos a mejorar para futuras iniciativas.

En total, se encuestó a 163 estudiantes de distintas instituciones educativas. A continuación, se presentan los principales resultados.

La primera pregunta formulada fue: "*¿Te gustó la experiencia en la que participaste*?". En la Figura 2 se observan las respuestas, donde la gran mayoría del alumnado (92%) manifestó una valoración positiva de la propuesta.

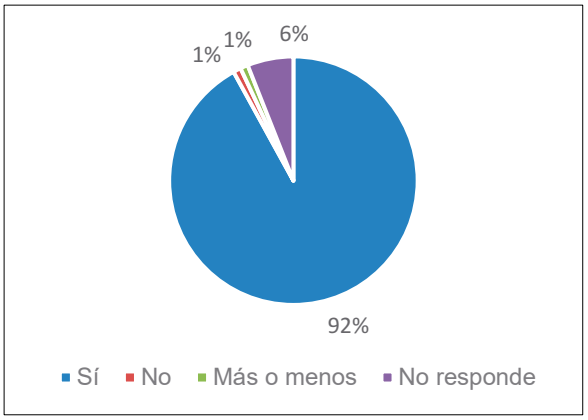


Figura 2: Respuestas a la pregunta: ¿Te gustó la experiencia en la que participaste?

Otra consulta realizada indagó sobre la modalidad preferida para futuras experiencias. La pregunta permitió respuestas múltiples, de modo que los estudiantes pudieran marcar más de una opción. Como se muestra en la Figura 3, la mayoría indicó su preferencia por actividades de carácter práctico (70%), en lugar de propuestas predominantemente teóricas.



Figura3: Respuestas a la pregunta ¿Cómo debería ser la nueva experiencia?

Asimismo, se preguntó a los estudiantes qué temas les gustaría abordar en futuras actividades. Alrededor de un tercio de los encuestados manifestó interés en contenidos relacionados con motores. Entre las demás opciones (Aeronáutica y Aerodinámica, Fuerzas y Gravedad, y Química), los porcentajes fueron similares, mientras que una minoría prefirió abordar temáticas de Electrónica, Robótica y Electricidad. Las respuestas se presentan en la Figura 4.

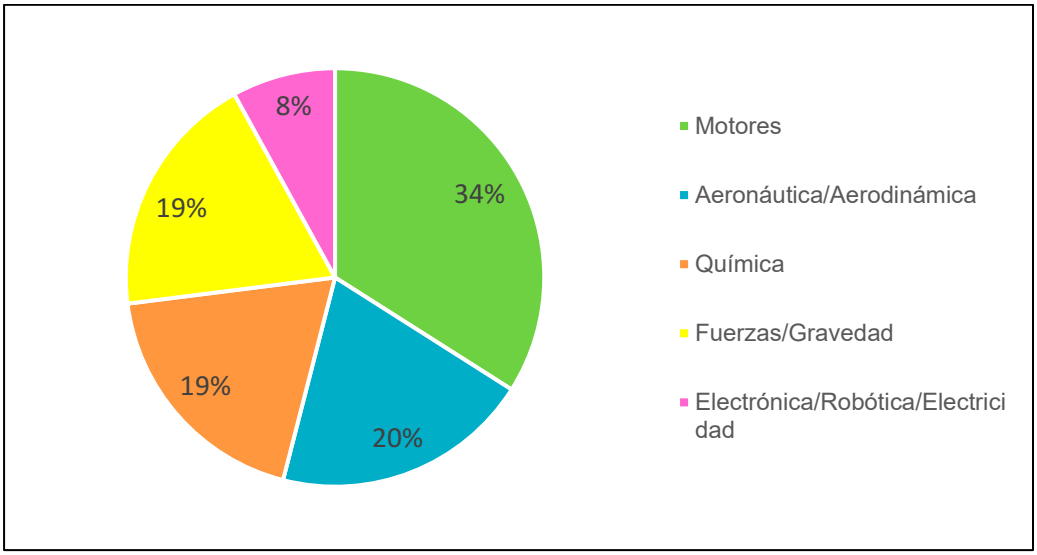


Figura 4: Respuestas a la pregunta: Contenidos explícitos a desarrollar en futuras experiencias.

Por último, uno de los grupos encuestados fue consultado específicamente sobre el uso de las instalaciones de la facultad. Los estudiantes destacaron la calidad del equipamiento y el estado de las aulas, expresando un especial interés en volver a realizar visitas al predio.

PROPUESTA

En base a los resultados de las encuestas y experiencias realizadas previamente, se proponen dos actividades para trabajar contenidos descriptos por Galileo y por Newton. Tales actividades se pueden desarrollar en nuestra facultad o en otras instituciones educativas como los colegios secundarios y tienen por objetivo la introducción al estudio de principios físicos a estudiantes.

Para la experiencia donde se trabajan los contenidos de la fuerza peso, primero se realizará un cuestionario a los estudiantes para observar que concepciones previas tienen del tema.

Luego, se invita a distintos alumnos voluntarios para que realicen distintas experiencias, como, por ejemplo, que arrojen dos botellas de harina de distinta cantidad para apreciar y sacar conclusiones de lo que observan.

Posteriormente, y utilizando una bomba de vacío, se realiza la misma experiencia teniendo en cuenta que el dispositivo carece de aire. Los elementos utilizados se muestran en la Figura 5. Además, se acompaña la experiencia un video de YouTube donde se observa que en la NASA se arroja una bola de boliche y una pluma en una cámara con aire y en otra al vacío.



Figura 5: Elementos principales para las experiencias de peso.

En otra de las actividades, dedicada al estudio de conceptos de Cinemática, los estudiantes realizan la experiencia de Galileo utilizando un plano inclinado y herramientas de Tecnologías de la Comunicación. Durante la actividad, se analizan la posición, la velocidad y la aceleración de un objeto, al tiempo que se introduce a los alumnos en el método científico.

En la Figura 6 se muestran los elementos utilizados en la experiencia, los cuales pertenecen a la facultad. Además, se sugieren dispositivos de bajo costo para que los establecimientos educativos puedan replicar la actividad.
Dado el éxito de la experiencia, en futuros encuentros proponemos que los estudiantes construyan sus propios dispositivos. Luego, en una clase conjunta, llevaremos a cabo la experiencia, ya sea en la escuela participante o en nuestra Unidad Académica.

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos con los dispositivos fabricados por los estudiantes y aquellos utilizados habitualmente en la facultad para experiencias similares. Para evaluar la recepción de la actividad y detectar posibles mejoras, se solicitará a los alumnos completar una encuesta que permitirá optimizar futuras implementaciones.



Figura 6: Elementos utilizados para estudiar cinemática (Galileo)

CONCLUSIONES

A pesar de la creencia generalizada de que las ciencias exactas generan poco interés entre los estudiantes, la realidad muestra que existe una genuina curiosidad por explorarlas. Sin embargo, esta motivación muchas veces se ve limitada por la falta de experiencias prácticas en el nivel secundario, lo que puede influir negativamente en la elección de carreras vinculadas a la ciencia y la ingeniería.

En este contexto, las actividades de extensión y transferencia cumplen un rol fundamental al propiciar el intercambio de conocimientos entre la universidad y la comunidad. Estas experiencias permiten a los estudiantes secundarios acercarse a la matemática y la física desde una perspectiva más intuitiva y aplicada, favoreciendo una comprensión más profunda de su impacto tanto en la vida cotidiana como en el desarrollo de tecnologías innovadoras.

Los resultados de las encuestas realizadas reflejan que los estudiantes valoran especialmente las experiencias prácticas, lo que subraya la importancia de continuar diseñando actividades experimentales que fomenten el aprendizaje activo. Además, el interés manifestado en temas específicos como motores, aerodinámica y robótica sugiere la necesidad de ampliar la oferta de experiencias que integren estos contenidos con enfoques didácticos innovadores.

En conclusión, generar espacios donde los jóvenes puedan interactuar con el método científico y experimentar de manera concreta los principios de la física y la matemática es clave para despertar vocaciones científicas y fortalecer el vínculo entre la educación secundaria y la formación universitaria en áreas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemática, por sus siglas en inglés). El fomento de este enfoque interdisciplinario no solo contribuye a una mejor comprensión de los conceptos científicos, sino que también potencia el desarrollo de habilidades fundamentales para los desafíos del siglo XXI.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Jacinto C, Terigi F. (2007) ¿Qué hacer ante las desigualdades en la educación secundaria? Cap. III Políticas de mejoramiento de las oportunidades de los jóvenes en la educación secundaria.

[2] J.A. Acevedo Díaz. (2004) Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 1 (1), 2004, 3-16

[3] M. B. Roble, P. Roux, J. Cornejo (2015), Acercando la Física a las Escuelas de Enseñanza Media desde la Universidad, Vol. 27, No. Extra, 2015, 343-348.

[4] E. Devece M. Tejerina, G. M. J. Fernández Lobo, M. Gamba, P. Pesco, S. Conconi, C. Del Río Pauletti, M. A. Bolino, (2021) “Conversatorios de Física Experimental en la Enseñanza Media Trayecto 2019 - 2021”. En 6º Jornadas ITEE - 2021 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

APLICACIONES DE LAS TIC PARA ANALIZAR EL MOVIMIENTO DE RODADURA SIN DESLIZAMIENTO

Videla Fabian[1]; Devece, Eugenio[1]; Torroba, Patricia[1]; Fernández Lobo, Gonzalo[1]; Porcel de Peralta, Benjamin[1]

[1]Unidad de Investigación IMApEC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
eugenio.devece@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Rototraslación, TIC, Procesamiento de imágenes

Introducción

El estudio del movimiento de rototraslación en sistemas físicos modelados como cuerpos rígidos es un tema central en la asignatura Física I de las carreras de Ingeniería. Este movimiento se puede pensar como una combinación de una traslación del centro de masas y una rotación pura respecto del centro de masas.Sin embargo, su complejidad conceptual representa un desafío para la comprensión del alumnado, como se refleja en las evaluaciones para acreditar la materia.

Uno de los objetivos del área de Física es fortalecer la formación experimental de los estudiantes mediante el uso de experiencias de laboratorio y tecnologías digitales [1] (Raviolo, Álvarez, y Aguilar 2011). En este trabajo, se presentará un análisis del movimiento de un cilindro que rueda sin deslizar, utilizando herramientas de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). A través de este enfoque, se busca representar gráficamente la evolución del sistema y validar los modelos teóricos abordados en clase.

El análisis se llevará a cabo mediante el software didáctico LoggerPro, que permite procesar filmaciones del movimiento del cilindro a partir del seguimiento de un punto del cuerpo en cada cuadro del video. Para cada instante, se registran las coordenadas $(x(t), y(t))$ y se grafican en función del tiempo. Con esta información, es posible calcular variables cinemáticas como la velocidad en distintos puntos del cilindro y compararlas con los valores teóricos previstos en los textos académicos. En particular, si el punto de análisis se ubica en el centro de masa del cilindro, se puede determinar su velocidad cómo la Velocidad del Centro de Masa (Vcm) y establecer su relación con las variables angulares que caracterizan el movimiento de rodadura sin deslizamiento.

El uso de esta herramienta didáctica ofrece una alternativa accesible y efectiva para el estudio de la cinemática del cuerpo rígido. A diferencia de otros métodos experimentales que requieren sensores u otros dispositivos específicos, esta propuesta solo requiere una filmación del fenómeno y un software de procesamiento de imágenes, en este caso, LoggerPro [2], con el que cuenta la cátedra.

Para evaluar el impacto de la actividad, al finalizar la experiencia se implementará un cuestionario mediante un formulario de Google. A través de este instrumento, los estudiantes responderán preguntas sobre los conceptos abordados y su percepción respecto a la actividad. A su vez, este cuestionario permitirá identificar áreas que requieren mayor profundización o modificación, así como aquellas que no fueron procesadas adecuadamente.

Desarrollo

Se analizó el movimiento de un rodillo, que se puede modelar como un cilindro macizo, desplazándose con movimiento de rototraslación con rodadura sin deslizamiento sobre un plano horizontal [3,4].

En la bibliografía de Física Clásica se aborda este movimiento como una superposición de dos movimientos: Uno de rotación pura respecto de un eje que pasa por el centro de masa y otro de traslación pura del centro de masa, de manera que al combinarlos

se obtiene un movimiento de rototraslación (Figura 1). Un análisis matemático enfocado en el estudio de un punto específico y evaluando su progresión temporal en los ejes horizontal y vertical, arrojaría resultados similares.

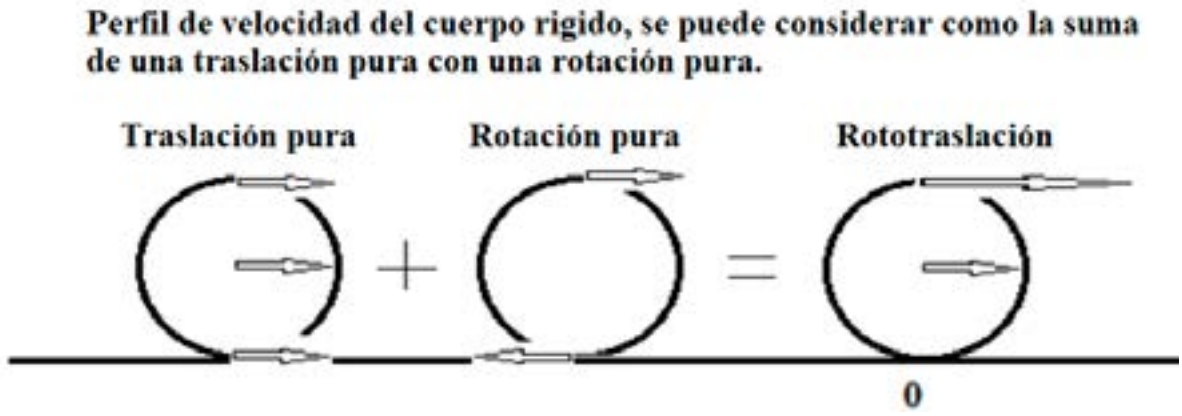


Figura 1. Superposición de movimientos para un cilindro bajo un movimiento de rototraslación sin deslizamiento, según lo abordado en la bibliografía.

En la figura 2 se muestra el movimiento de un cilindro que rueda sin deslizar y en el cual se han colocado dos leds: uno en el borde del cilindro y otro en el centro. Por un lado se puede apreciar que el movimiento del led instalado en el centro del cilindro es rectilíneo, mientras que el led instalado en la periferia presenta una curva que se define como **cicloide**. Además, se puede notar que cuando el punto que está en el borde del cilindro toca el piso, la intensidad del led periférico es mayor, permitiendo deducir que en ese punto, la fuente de luz idealmente estuvo detenida instantáneamente y por lo tanto tiene velocidad nula. En ese instante, el eje donde se ubica el led, es el eje instantáneo de rotación.

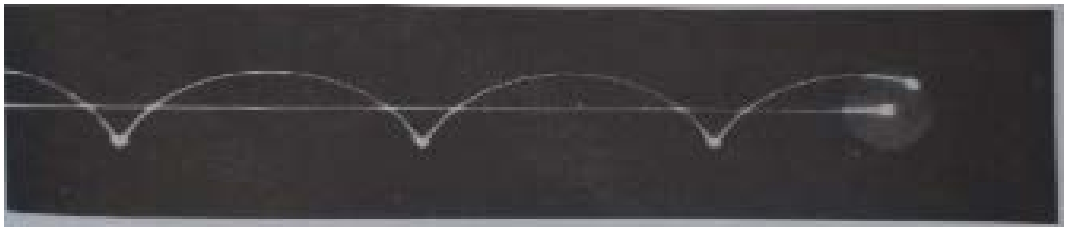


Figura 2. Imagen de los leds instalados en la periferia y en el centro de un cilindro en un plano horizontal.

Como resultado de estos estudios se deduce que el movimiento para un punto ubicado en la periferia del cilindro es una cicloide.

Representación Cartesiana de la cicloide:

Para el estudio de una curva cicloide en coordenadas cartesianas (x, y), se deben considerar las ecuaciones paramétricas de un círculo de radio R rodando a lo largo del eje X. Luego, las ecuaciones de movimiento en X e Y, incorpora parámetros como el Radio (R) y el Ángulo (θ) de rotación alrededor del centro. Como resultado las ecuaciones de la trayectoria representan la curva cicloide que se describe a continuación en su expresión paramétrica:

$$x(\theta) = R * \theta - R * sin\,\theta \quad (1) \qquad y(\theta) = R - R * cos\,\theta \quad (2)$$

Si se grafica la función de posición presentada para un radio $R = 0.1m$, se obtiene la figura 3.

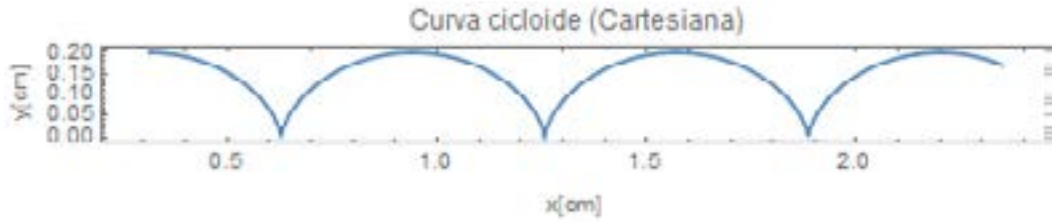


Figura 3. Curva cicloide en representación cartesiana.

Esta representación corresponde al caso de rodadura sin deslizamiento es decir cada punto de la circunferencia toma contacto con el piso un tiempo infinitesimalmente pequeño (no desliza).

Representación Polar de una cicloide:

La representación de una cicloide en coordenadas polares (r, θ), donde r es la distancia desde el origen y θ es el ángulo rotado con respecto al eje x positivo, tiene la siguiente expresión:

$$r = R \cdot (1 - cos\,\theta) \qquad (3) \qquad\qquad \theta = \theta \qquad (4)$$

Según los esquemas presentados permiten deducir el movimiento de rototraslación como una superposición de un movimiento de traslación pura más un movimiento de rotación.

Un análisis detallado del esquema presentado en la Figura 1, permite identificar la superposición de movimientos introducida previamente:

- En el primer esquema se visualizan los vectores que representan la velocidad de traslación de la parte inferior, del centro y del extremo superior.
- En el segundo esquema, se indican las velocidades tangenciales para esos mismos puntos. (Opuestas sobre los puntos de la circunferencia y nula en el centro).
- En el esquema final, se puede observar la superposición de ambos movimientos, del cual se puede notar que
  - El punto en contacto con el piso presenta velocidad nula. $V = 0$
  - El punto ubicado en el centro tiene la velocidad del centro de masa. $V = Vcm$
  - El punto ubicado en el extremo superior tiene el doble de la velocidad que en el centro de masa. $V = 2 * Vcm$

El análisis de este cuerpo es un caso particular, ideal, donde el cuerpo se estudia para un estado estacionario. El cuerpo ya se encuentra en movimiento a la hora de ser estudiado, de manera que ya tiene energía cinética de rotación y energía cinética de traslación, que de acuerdo con el teorema de conservación de la energía cinética, se conserva.

Actividad experimental

El cuerpo a analizar se puede modelar como un cilindro con las siguientes características: radio $R = 0.1m$, masa $m = 0.842Kg$. Se genera un movimiento de rodadura sin deslizamiento en el cilindro sobre una pista horizontal (previamente verificada con un nivel) a efectos de que una vez iniciado el movimiento, en ese lapso, se mueva a velocidad constante y permitir el estudio del fenómeno indicado.

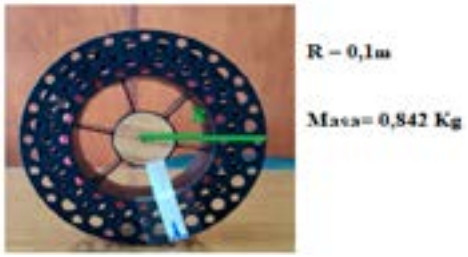


Figura 4. Cuerpo bajo estudio.

El estudio de este fenómeno se llevó a cabo mediante la filmación del movimiento del cuerpo rígido rodando sobre un plano horizontal. En el Área Técnica del departamento se disponen de sensores de posición, los cuales permiten medir la velocidad del centro de masa del cuerpo. Esta opción se utilizó para validar los resultados obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes, comparando ambos métodos experimentales.

A continuación se presenta la figura 5, con el estudio de este fenómeno partiendo de un movimiento de traslación pura respecto de un eje que pasa por el centro de masa (Figura 5, Izq.), para continuar luego con la rotación pura respecto de ese mismo eje (Figura 5, Der.).

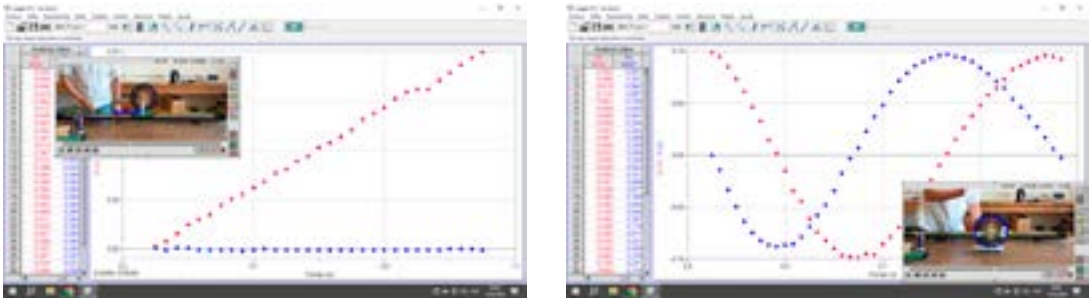


Figura 5. Gráfico de posición en x y en y, en función del tiempo. (Izq.) Movimiento de traslación pura. (Der.) Movimiento de rotación pura. (En rojo se presenta x(t). En azul se presenta y(t))

La superposición de estos movimientos, da como resultado la cicloide que se puede observar en la figura 6 (Izq.). Para realizar estos gráficos, se estudió la evolución de un punto en la superficie del cilindro, ubicado al final de una cinta blanca adherida al cuerpo (Figura 4). A partir de esta referencia, se registraron las diferentes posiciones de un punto sobre la rueda a medida que transcurría el tiempo, representadas en la parte izquierda de la figura 6 mediante puntos azules.



Figura 6. Estudio del progreso temporal del cuerpo rígido. (Izq.) Cinta blanca adherida al cuerpo. (Der.) Centro de masas.

Estas imágenes fueron analizadas a través del software didáctico Logger-Pro, permitiendo obtener dos curvas en el plano xy. La curva representada en azul en la figura 6 representa los registros de las posiciones en el eje vertical en función del tiempo ($y(t)$) cuyo rango se encuentra acotado en el intervalo [0:2R], mientras que la curva trazada en rojo se corresponde con el movimiento del punto respecto al eje horizontal ($x(t)$) y coincide con la superposición de una recta más una senoidal tal como predice la ecuación 1.

La ecuación 1, se puede reformular en función del tiempo si se parametriza el ángulo θ como $\theta = \omega * t$. Con esta modificación, se obtiene una ecuación temporal para la posición del punto bajo estudio respecto al eje horizontal:

$$x(t) = R * \omega * t - R * sen(\omega t) \quad (5)$$

En la figura 7 se puede visualizar la representación gráfica de esta ecuación. El gráfico representa la posición en función del tiempo de un punto ubicado en la periferia del cuerpo rígido (Fig. 6, Izq.). La curva azul y roja representan la posición en el eje vertical y horizontal respectivamente. Por último, la línea negra sólida es el ajuste lineal de la ecuación 6 y la pendiente de la misma coincide con la velocidad del centro de masas.

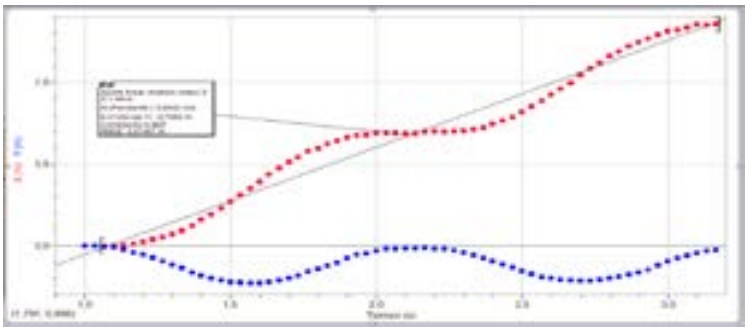


Figura 7. Posición del punto bajo estudio en la periferia del cilindro en función del tiempo.
Ajuste lineal: $x(t) = -0,7062 + 0,6542 * t$

A partir de los valores obtenidos de $x(t)$, el programa ajusta una recta con la siguiente expresión: $x(t) = -0.7062 + 0.6542 * t\,[m]$. Donde la pendiente de esta recta representa la velocidad del centro de masa del cilindro.

Como resultado de la experiencia, y en concordancia con la ecuación 6, se deduce que la pendiente de la recta que mejor ajusta la curva punteada en rojo corresponde a la velocidad del centro de masa del cilindro macizo. Cabe destacar que los puntos en rojo y en azul fueron obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes utilizando el software LoggerPro. Esta curva acuerda aceptablemente con los resultados teóricos como puede verse en la figura 8:

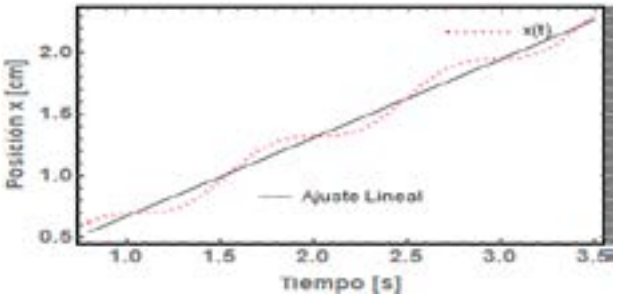


Figura 8. Gráfica de la posición del punto en función del tiempo, obtenida con las expresión (5) la expresión del ajuste lineal resulta $x(t) = -0,0307062 + 0,6382 * t$.

Al realizar el mismo procedimiento teniendo en esta oportunidad al Centro de masas del cilindro como punto bajo estudio (Fig. 6, Der.), se obtiene experimentalmente la velocidad del Centro de Masa del cuerpo rígido.

Al comparar la pendiente del ajuste lineal obtenido de puntos medidos experimentalmente de acuerdo a la figura 7, y el estudio acorde a la figura 8, se puede verificar que los ajustes lineales coinciden con un grado de exactitud elevado.

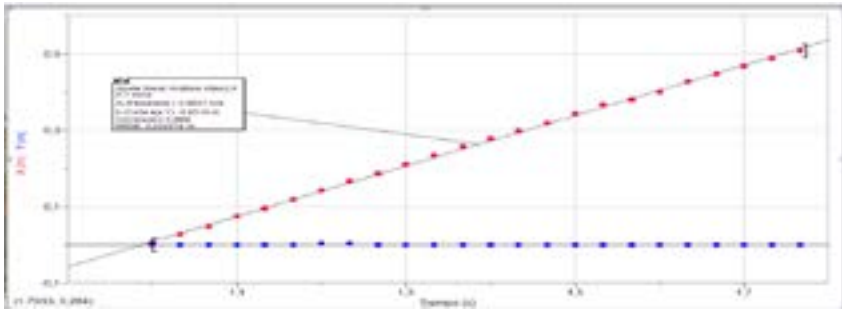


Figura 9. Posición del punto bajo estudio en el centro de masa del cilindro en función del tiempo.
Ajuste lineal: $x(t) = -0,6514 + 0,6601 * t$

Para finalizar, se presenta una alternativa extra para la comprensión de este movimiento. Aprovechando nuevamente la versatilidad del programa Logger-Pro, podemos visualizar cómo evoluciona la velocidad de un punto en cada instante del tiempo. Es decir, el programa permite analizar la derivada de la posición en cada punto del gráfico. La figura 10 muestra tres imágenes estudiadas mediante este programa, resaltando con una línea negra

sobre la curva de $x(t)$, la pendiente en los puntos inferior (Izq.), medio (Cen.) y superior (Der.) del cilindro.

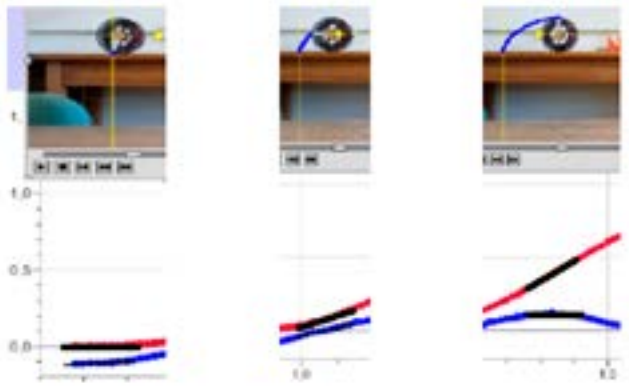


Figura 10. Gráfica de la posición en función del tiempo, con representación de la derivada instantánea en negro. (Izq.) En el punto inferior ubicado sobre la periferia del C.R. (Cen.) En la posición del centro de masas. (Der.) En el punto más elevado de la periferia del C.R.

De esta manera, si analizamos la curva roja de la figura 10 se puede notar que la posición del punto bajo estudio en el eje vertical (eje y), es tal que el punto bajo estudio, se encuentra en contacto con el suelo, de manera que la velocidad en el eje horizontal para este punto y en ese instante, tendrá que ser cero. Para esto, se traza la recta negra para ese instante, cuya pendiente es nula, verificando que la velocidad en ese punto será cero.

Si se realiza un análisis de la gráfica para la posición del punto bajo estudio (es decir, ubicado en la misma altura del centro de masas), la velocidad esperada para ese punto será la velocidad del centro de masas como se aprecia en la figura 9. Un análisis equivalente permite verificar ello.

Podemos ver que este perfil de velocidades coincide con el que está analizado desde el punto de vista teórico indicado en la figura 1

Cuando el punto llega a una distancia 2R del piso, la pendiente de la recta de la figura 10 de la curva roja es el doble de la obtenida en la figura 9. Por lo tanto, la velocidad en dicho punto es el doble de la del centro de masas.

Conclusiones

Esta experiencia, permite validar los modelos teóricos a través de una actividad experimental sencilla.

Además la misma, no requiere de equipamiento sofisticado como sensores, solo basta realizar la filmación de la misma para su posterior análisis.

Esta herramienta proporciona resultados equivalentes a los que se encuentran en los libros de texto que utilizan los estudiantes, pero a través de un enfoque diferente y original, siendo además de muy bajo costo ya que no requiere de dispositivos, (sensores), para realizar el relevamiento de las variables cinemáticas, solamente se necesita de una filmación del evento para poder realizarla, y algún programa de procesamiento de imágenes en nuestro caso utilizamos el software didáctico, LoogerPro , con el que cuenta la cátedra.

Bibliografía

[1] Raviolo, A.; Álvarez, M. y Aguilar, A. (2011). La hoja de cálculo en la enseñanza de la Física: re-creando simulaciones. *Revista de Enseñanza de la Física*, 24 (1), pp. 97-107

[2] Pagina web: https://www.vernier.com/product/logger-pro

[3] RAYMOND A. SERWAY (1997)- FÍSICA Tomo I- Cap 11 (movimiento de rodamiento, momento angular y torsión), pág: 309 a 338

[4] Robert Resnick, David Halliday, Kenneth S. Krane - FÍSICA volumen I - Cap 9 (dinamica rotacional), pág: 175 a 206

ÁREA TÉCNICA, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN DE DISPOSITIVOS DIDÁCTICOS, TRADICIONALES Y TIC

Gastaldi Hernan[1]; Moreyra Nicolas[1]; Cipolla Rodrigo[1]; Morales Diego[1]; Verdina, Matias[1]; Devece, Eugenio[2]; Fernández Lobo, Gonzalo M. J.[2]

[1]Nodocente Área técnica Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
[2]Unidad de Investigación IMAPeC - Departamento de Ciencias Básicas - Facultad de Ingeniería – UNLP - 1 y 47, La Plata – Bs. As. – Argentina
eugenio.devece@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Instrumentos, dispositivos, trabajo colaborativo interclaustro

Introducción

Las materias del área de Ciencias Básicas en las carreras de Ingeniería proporcionan conocimientos que son fundamentales para la comprensión de los cursos superiores. Es de esta manera que la correcta asimilación de estos conceptos resulta esencial para el progreso académico de los estudiantes y el adecuado desarrollo de su formación.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), se ha trabajado en la importancia del desarrollo de experiencias de laboratorio, destacando el papel clave de los dispositivos experimentales para realizarlas. Aquí se puede apreciar la relevancia de un equipo de trabajo que se enfoque en garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y dispositivos, así como del desarrollo de nuevo equipamiento. [1] (Devece, Grumel, Fernández Lobo, Gastaldi, Moreyra, Morales, Cipolla, 2023). [2] (Pagliaro, Leonardo; Epifanio, Alejandro; Cipolla, Rodrigo; Gastaldi Hernan; Grumel, Eduardo Emilio; Trivi, Marcelo Ricardo, 2019).

En particular, en los cursos de Física I, las clases teórico-prácticas se complementan con el uso de distintos dispositivos y demostraciones experimentales. Por otro lado, también se destaca el uso de simulaciones para el desarrollo de los contenidos. Esta es una práctica común y con resultados efectivos ya que facilita la visualización de los fenómenos estudiados. En este contexto, el apoyo de las autoridades de la Facultad ha permitido avanzar en la mejora del Área Técnica del Departamento de Ciencias Básicas, respondiendo a las solicitudes del personal docente y nodocente. Estas mejoras incluyen la incorporación de nuevo personal y la adquisición de herramientas necesarias para optimizar las experiencias prácticas.

El Área Técnica desempeña un rol central en este proceso, con dos funciones principales: (1) diseñar y desarrollar nuevos dispositivos y software didáctico, y (2) mantener y reparar los equipos existentes. Su trabajo ha sido fundamental para mejorar la enseñanza de conceptos físicos, permitiendo a los estudiantes interactuar con fenómenos experimentales de manera más efectiva y cercana favoreciendo la incorporación de competencias inherentes a la formación de un/una profesional. [3-6] (Pesa, Bravo, Pérez, 2012), (Costa, Torroba, Devece 2013), (Devece, Torroba, Videla 2015), (Torroba, Devece, Trípoli, Aquilano 2016).

Por otro lado, este trabajo resalta la importancia de la inversión realizada por la Facultad en el Área Técnica, ha tenido un impacto positivo en la jerarquización del personal nodocente, la ampliación del equipamiento y el uso más intensivo de los dispositivos disponibles. Entre los enfoques que se buscan destacar se encuentra la relevancia del desarrollo de habilidades y conocimientos del equipo de trabajo, de la capacitación contínua.

Es gracias a esto que se ha avanzado en la incorporación de nuevas experiencias prácticas en la enseñanza de la física.

En este trabajo, presentamos la última versión de un dispositivo TIC desarrollado en el Área Técnica, diseñado con una interfaz para registrar y graficar datos de temperatura en función del tiempo. Además, este mismo dispositivo permite medir la posición en función del tiempo en experiencias de cinemática y Leyes de Newton, generando gráficos de posición, velocidad y aceleración.

Un aspecto clave de este avance ha sido la optimización del mantenimiento de los equipos TIC. Mediante el uso de componentes accesibles y de bajo costo, hemos desarrollado dispositivos capaces de replicar las funciones de equipos comerciales utilizados en la Facultad, reduciendo costos sin comprometer la calidad de las experiencias prácticas.

Finalmente, también se presentan dispositivos experimentales tradicionales utilizados en los cursos de Física I, con el objetivo de mostrar la evolución y complementariedad entre los enfoques tecnológicos y los métodos convencionales en la enseñanza de la física.

Desarrollo

Como se ha mencionado antes, los dispositivos realizados en el área técnica, tienen como objeto clarificar los contenidos dictados durante las materias que pertenecen al departamento de Ciencias Básicas. En este documento nos enfocaremos en dos de los nuevos dispositivos realizados por el equipo de trabajo.

El primero de ellos es un dispositivo tradicional, que permite abordar el principio de Independencia de Movimiento [7] (Raymond A. Serway). El segundo, es un equipo electrónico enfocado en las nuevas tecnologías de información y comunicación (TIC) que permite medir distintas magnitudes en tiempo real.

En la figura 1, se puede apreciar un desglose de piezas del dispositivo tradicional:

- Base
- Soporte ranurado
- Martillo
- 2 Esferas
- Freno/Pulsador
- Taco

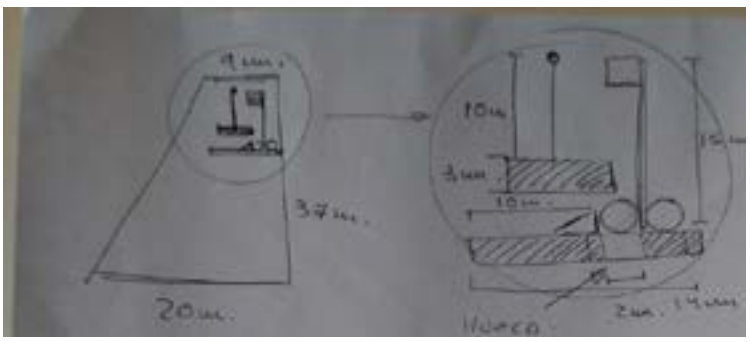


Figura 1. Croquis del dispositivo tradicional.

Este equipo está compuesto por un soporte que sirve de apoyo horizontal para las esferas durante el reposo, un freno/pulsador, que durante el reposo, apoya una de las esferas (la interior), hacia el taco y en conjunto evitan que caiga, mientras que al salir de este estado, se encarga de impulsar la esfera exterior en sentido horizontal, mientras que libera a la esfera interior, permitiendo que caiga horizontalmente a través de la ranura del soporte. El cambio de estado del freno/pulsador es realizado por un impacto corto dado por el martillo. Una vez

que las esferas comienzan su movimiento, una realizará un movimiento de caída libre, mientras que la otra un movimiento acelerado en el eje vertical y a velocidad constante en el eje horizontal. La base de este equipo brinda el contrapeso necesario.

Una práctica habitual y recomendada durante la demostración de esta experiencia es la utilización de los teléfonos celulares con cámara lenta para apreciar y capturar en el para visualizar el detalle de este movimiento, pudiendo captar el preciso instante en que las dos esferas impactan el suelo y la posición de cada una de las esferas en cada momento del movimiento, pudiendo visualizar los conceptos de Independencia de Movimiento, (IM). De esta manera se favorece además la interacción con los estudiantes facilitando la incorporación de contenidos teórico prácticos.

El funcionamiento de este dispositivo es sencillo:

1. Se levanta el martillo una altura suficiente para que al ser liberado golpee al impulsor.
2. El freno/pulsador, al momento de ser impactado, golpeará a la esfera exterior y perturbará el estado de equilibrio de la esfera interior.
3. La esfera exterior comienza su movimiento en el eje horizontal debido a la disposición de la base.
4. La esfera interior, al perturbarse el estado de equilibrio en el que se encuentra inicialmente, comenzará a caer sobre el eje vertical debido a la disposición de la ranura sobre el soporte.

Este simple pero práctico dispositivo, permite visualizar con claridad el concepto de Independencia del camino. Además de ello, es posible desarrollar conceptos como impulso, y energía. (Se puede visualizar el video de este dispositivo bajo funcionamiento en los canales de difusión del departamento).

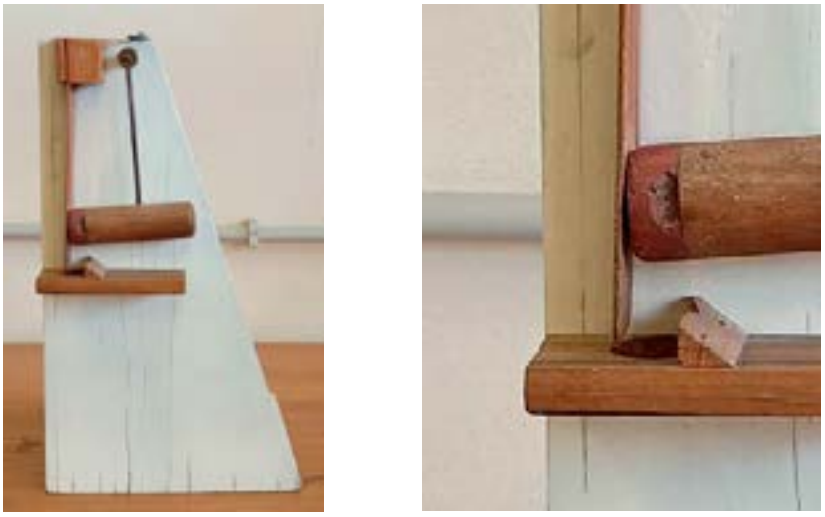


Figura 2. (Izq) Vista frontal general del dispositivo de IM. (Der) Vista frontal a detalle del dispositivo de IM.

El segundo dispositivo se trata de un equipo de mediciones electrónicas basado en la tecnología Arduino UNO. El potencial de este material, va desde mediciones cinemáticas como posición, velocidad y aceleración en función del tiempo hasta mediciones de temperatura, permitiendo abordar diversos contenidos dictados en la materia. El equipo de trabajo se encuentra trabajando en el desarrollo de la interfaz gráfica de trabajo para este dispositivo.

En la figura 3 se puede visualizar el desglose básico de piezas del dispositivo electrónico.

- Arduino UNO
- Display de 16x2
- Sensor de ultrasonido HC-SR04
- Cable USB A-B
- Sensor de temperatura DS18b20.

El equipo de trabajo fue programado de manera que no requiere una computadora para ser utilizado, permitiendo al alumnado la toma de datos en tiempo real a partir de la



visualización del display. Sin embargo, la utilización de una computadora permite disponer de



una interfaz gráfica que facilita la toma de datos y expresar estos a través de gráficos.







Figura 3. (Izq.) Placa Arduino UNO. (Cen. Izq.) Display de 16x2. (Cen.) Sensor de ultrasonido HC-SR04. (Cen. Der.) Cable USB A-B. (Der.) Sensor de temperatura DS18b20.

En las siguientes figuras se puede visualizar la interfaz gráfica desarrollada por el equipo del Área técnica y la interacción del alumnado para con la misma. Durante la ejecución del programa (Figura 4, Izq.) con el logo del departamento de Ciencias Básicas de la FI de la UNLP. La pantalla principal, (Figura 4, Der.) permite observar las distintas configuraciones actuales de este equipo. Entre las configuraciones básicas, se encuentra la asignación del

puerto a utilizar desde la computadora a la placa Arduino y el tipo de medición que se desea realizar. En esta primera instancia se presentan dos opciones: Termómetro y Cinemática. Actualmente la conexión Computadora - Arduino UNO se realiza mediante puerto serial utilizando el Cable USB A-B.





Figura 4. (Izq) Pantalla de ejecución de la GUI desarrollada. (Der) Pantalla de inicio de la GUI desarrollada.

A continuación y a modo de ejemplo, se muestran las distintas capacidades del dispositivo al ser utilizado cómo termómetro.

Una vez configurado el Hardware del equipo, y seteada la aplicación para funcionar en modo termómetro, la ventana (Figura 5, Izq.) muestra en tiempo real la temperatura que se recibe desde el Arduino y representa las distintas muestras tomadas en la tabla. Además, permite setear la cantidad de muestras que se desea tomar (una muestra por segundo). Finalizada la medición, el programa permite graficar (Figura 5, Cen.) y exportar a la tabla a Excel (Figura 5, Der.) los datos obtenidos de temperatura en función del tiempo.

Todas las interfaces gráficas y las diferentes habilidades del dispositivo fueron diseñadas a partir de la programación en Python con el uso de la aplicación Visual Studio Code.



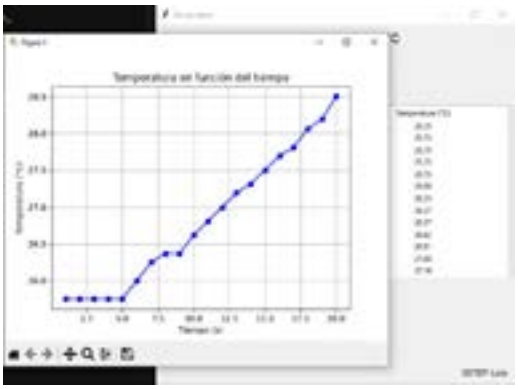




Figura 5. (Izq.) Pantalla principal de la aplicación Termómetro. (Cen.) Gráfico temperatura vs tiempo realizado por la aplicación. (Der.) Datos exportados a una tabla excel.

Cómo se mencionó previamente, el dispositivo permite su utilización en ausencia de una computadora. A continuación, se puede visualizar dos ejemplos de ello donde las medidas se visualizan a través del display 16x2 que muestra los valores en tiempo real (Figura 6, Izq. Estado: Termómetro; Figura 6, Der. Estado: Cinemática).

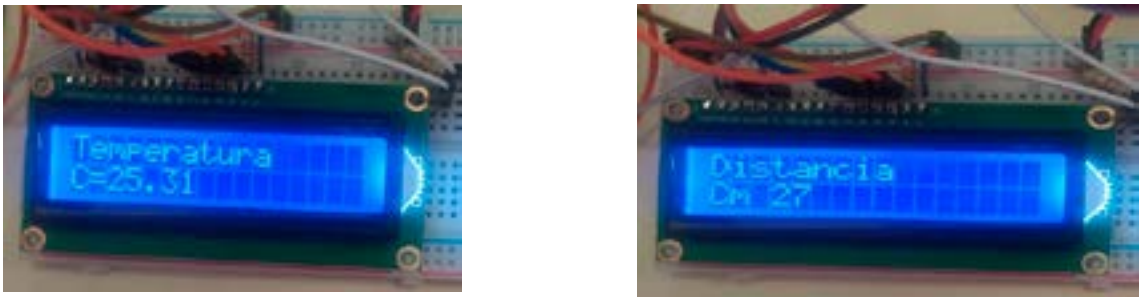


Figura 6. (Izq.) Dispositivo preparado para realizar mediciones de temperatura. (Der.) Dispositivo preparado para realizar mediciones de cinemática.

Cómo últimas referencias, se presenta la figura 7 donde se puede apreciar el dispositivo final ya cerrado y preparado para su utilización y una comparativa del dispositivo desarrollado en comparación con su equivalente comercial.



Figura 7. (Izq.) Vista frontal del Dispositivo final. (Cen.) Dispositivo final desarrollado por el Área técnica comparado con el equipo comercial. (Der.) Vista trasera del dispositivo final.

Conclusiones

La cantidad de equipamiento es uno de los limitantes a la hora de organizar las clases y las distintas experiencias de laboratorio. De manera que contar con una mayor cantidad de equipos disponibles para realizar las experiencias tantos las de laboratorio como las demostrativas, permite una mejor organización de las clases en los distintos grupos del Área de física

Por otra parte, trabajar con estos dispositivos, favorece la integración de las competencias digitales en los entornos de estudio, y particularmente durante las experiencias de laboratorio.

También se destaca la importancia del trabajo conjunto de los distintos claustros con sus expertises propias. Esta interacción propicia la generación de nuevos dispositivos, optimiza el espacio de trabajo al crear un ambiente agradable. En esta ocasión, el equipo de trabajo utilizó la plataforma Arduino enfocados en el reemplazo de algunos de los dispositivos comerciales con los que cuenta la cátedra. Este primer módulo del equipo muestra el potencial que representa este elemento en un equipo de laboratorio, y más aún la importancia de la capacitación continua del equipo de trabajo. La relación económica entre el equipo comercial comparado con el equipo desarrollado, es de aproximadamente 5, de manera que la inversión que abocada a la adquisición de un dispositivo comercial permitiría adquirir el equipo necesario para desarrollar 5 equipos equivalentes. La combinación de la experiencia del equipo de trabajo con el conocimiento técnico y las herramientas disponibles ha permitido generar dispositivos innovadores que enriquecen la enseñanza.

Trabajos futuros

El equipo de trabajo actualmente se encuentra en proceso de desarrollo de un manual instructivo para el uso de este dispositivo digital y para los futuros desarrollos que se pondrán a disposición junto con este mismo equipo.

Además, se realizará una guía de experiencias que permite este equipo, permitiendo al usuario no habituado a la misma, hacer un uso adecuado del mismo con una breve lectura. En línea con el trabajo realizado por la cátedra, este dispositivo tiene un gran potencial para el desarrollo de problemas abiertos para desarrollar con los estudiantes.

Bibliografía

[1] Devece, E., Grumel, E. E., Fernández Lobo, G. M. J., Gastaldi, H., Moreyra, N., Morales, D., & Cipolla Miguens, R. (2023). Área técnica: ¿fábrica de conocimientos?. En VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 25 al 27 de abril de 2023).

[2] Pagliaro, Leonardo; Epifanio, Alejandro; Cipolla, Rodrigo; Gastaldi Hernan; Grumel, Eduardo Emilio; Trivi, Marcelo Ricardo (2019). PALC-1: placa autónoma para la realización de laboratorios de corriente continua y corriente alterna, cátedra Física II. V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la FI UNLP (pp 190-192)

[3] Pesa, M., Bravo, S., & Pérez, S. (2012). La importancia de las actividades de laboratorio en la formación de ingenieros. In Memorias del Décimo Primer Simposio de Investigación en Educación en Física (pp. 61-69).

[4] Torroba, P., Costa, V., & Devece, E. (2013). Conceptualización de temas enmarcados en la Mecánica Clásica. In 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 (pp. 1-5).

[5] Devece, E., Torroba, P. L., & Videla, F. A. (2015). El empleo de las TIC para validar los modelos teóricos en el estudio del movimiento de rototraslación. Rev. Ens. Física, 27.

[6] Torroba, P. L., Devece, E., Trípoli, M. D. L. 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 Enseñanza de la Física, 28.

[7] Raymond A. Serway (1997) - Física Tomo I - Cap 4 (Movimiento en dos dimensiones (pp. 71-84)

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS OBJETIVO Y AUTOMÁTICO EN LA DETECCIÓN DE OBJETOS OCULTOS MEDIANTE SPECKLE DINÁMICO DE MÚLTIPLES LONGITUDES DE ONDA.

Buffarini[1] , Leandro y Tebaldi[1,2] , Myrian C.

[1] Centro de Investigaciones Ópticas, (CONICET-UNLP-CIC)

[2] Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, UNLP

leandrob@ciop.unlp.edu.ar

RESUMEN

Proponemos emplear una técnica óptica basada en el fenómeno speckle para revelar dibujos ocultos. El experimento emplea iluminación con múltiples longitudes de onda y algoritmos ajustables para procesar las imágenes de speckle dinámico. El método propuesto genera diferentes resultados dependiendo de los parámetros de los algoritmos. El objetivo de este trabajo es identificar la combinación óptima de parámetros para lograr la mejor visualización de la imagen recuperada independizándonos del juicio visual subjetivo, empleamos técnicas de aprendizaje automático no supervisado. Los resultados obtenidos permiten verificar que este enfoque facilita el procedimiento de selección y ofrece un método objetivo y no invasivo. El procedimiento propuesto tiene potencial para extenderse a la detección de pinturas ocultas, artefactos arqueológicos y otros experimentos de speckle dinámico.

1 INTRODUCCIÓN

La recuperación de escrituras y dibujos ocultos es un tópico de gran interés en arqueología. Para preservar los objetos del patrimonio cultural para futuras generaciones, es fundamental realizar estudios no destructivos [5-8]. Entre los numerosos métodos utilizados para este propósito se incluyen la radiación sincrotrón, las técnicas ópticas (imágenes multiespectrales por reflexión y transmisión, tomografía de coherencia óptica), las técnicas de rayos X (fluorescencia de rayos X, espectroscopia de fluorescencia de rayos X, microtomografía computarizada de rayos X y contraste de fase de rayos X) y enfoques basados en Thz. Sin embargo, aunque estas técnicas no dañan los objetos bajo estudio, suelen requerir instrumentos costosos y su difícil implementación las hace poco adecuadas para analizar muestras en entornos arqueológicos y patrimoniales [1-4].

En este sentido, consideramos que un enfoque basado en métodos de *speckle* de bajo costo, fácil acceso y que permita acceder a información oculta sin dañar el documento sería altamente beneficioso para su implementación *in situ*, sin necesidad de trasladar las piezas a laboratorios especializados. La técnica óptica propuesta requiere instrumentos relativamente económicos y accesibles, como láseres como fuente de iluminación y cámaras para la adquisición de datos, que posteriormente serán procesados.

Para validar la propuesta, iluminamos con un haz láser expandido el lado no dibujado de una réplica de papiro egipcio. En nuestra metodología, la actividad de *speckle* de la muestra se induce calentando el objeto con una lámpara incandescente y, posteriormente, iluminándolo con distintas longitudes de onda para adquirir los patrones dinámicos de *speckle*. Aplicamos algoritmos ajustables con diferentes conjuntos de parámetros para recuperar la información en los objetos bajo estudio a partir de las imágenes de *speckle* dinámico. La técnica permitió obtener distintos resultados de acuerdo con el conjunto de parámetros y longitudes de onda de fuentes de iluminación utilizadas. Las imágenes recuperadas se compararán con la imagen original de la réplica del papiro para validar la propuesta. Una vez validada la técnica, esta metodología podría extenderse a muestras de contenido desconocido para examinar objetos de interés histórico. Finalmente, proponemos el uso de técnicas de aprendizaje automático no supervisado para identificar la combinación óptima de parámetros que permite lograr la mejor visualización de la imagen recuperada sin depender del juicio visual subjetivo. Para clasificar las imágenes reconstruidas, se empleó el algoritmo de agrupamiento *K-Means*.

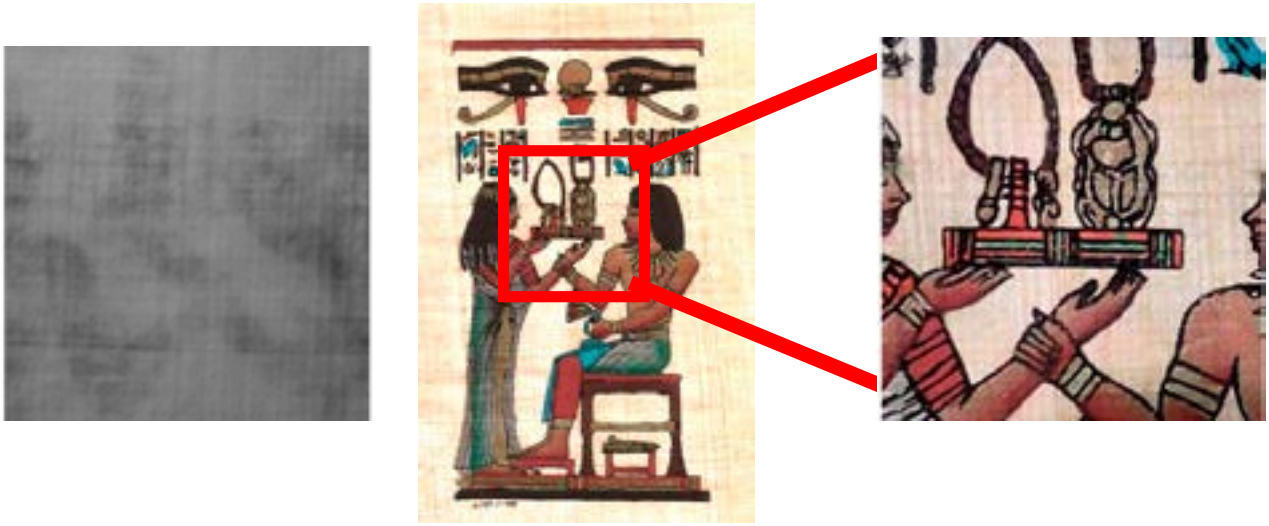
2 RESULTADOS EXPERIMENTALES: MUESTRA BAJO ESTUDIO DIBUJO EN PAPIRO

Se llevaron a cabo experimentos de *speckle* dinámico utilizando como objeto bajo estudio una réplica de un dibujo egipcio en un papiro (ver Figura 1). Fue iluminada la superficie sin pintar del objeto. Para asegurar que el dibujo no fuera visible por translucidez, el mismo se colocó sobre un fondo opaco.

En nuestra propuesta, los patrones de *speckle* se obtuvieron iluminando la muestra con luz láseres de estado sólido bombeado por diodos de 473 nm y 532 nm, un láser gaseoso de He-Ne (632.8 nm) y un diodo infrarrojo (780 nm). El tamaño promedio del *speckle* aumenta con la longitud de onda de iluminación siendo el tamaño promedio del *speckle* para 532 nm de aproximadamente 30 µm. Los haces láser fueron expandidos y atenuados para evitar causar daño a la muestra bajo estudio. La actividad de *speckle* en la muestra se induce iluminando el papiro con una lámpara incandescente de 50 lux durante 5 minutos, lo que provoca un aumento de temperatura de aproximadamente 3 ºC. Las imágenes de actividad de *speckle* fueron obtenidas una vez apagada la lámpara incandescente.

Se capturaron y procesaron 4000 imágenes de *speckle* obtenidas para cada longitud de onda mediante una cámara CCD Pulnix TM-6CN con un tamaño de celda de 8.6 µm × 8.3 µm. Las imágenes fueron digitalizadas y procesadas en una computadora personal. La exploración de múltiples longitudes de onda permitió observar distintos resultados, dependiendo de la penetración de la luz en el objeto y la reflectividad diferencial de los distintos colores del dibujo.

Para el procesamiento de imágenes dinámicas de speckle, se empleó un conjunto de algoritmos, incluyendo Fujii, Diferencia de Valores Absolutos (AVD), Diferencias Generalizadas (GD) y algoritmos *tunables* o ajustables τ [9-10]. Los tres canales de color de la imagen RGB reconstruida se obtiene combinando los resultados que surgen del empleo de los algoritmos mencionados con diferentes parámetros e iluminando la muestra con diferentes longitudes de onda. Los resultados obtenidos muestran imágenes con calidades visuales diversas.



(a) (b)

Figura 1: (a) Imagen obtenida al iluminar la muestra con una lámpara incandescente desde su lado no dibujado. b) Réplica pintada sobre papiro y la región seleccionada para nuestro análisis.

3 DISCUSIÓN SOBRE LOS ALGORITMOS

En esta sección, abordamos las limitaciones asociadas con las técnicas de procesamiento de speckle dinámico propuestas, que incluyen:

3.1 **Ausencia de un algoritmo descriptor universal** No existe un algoritmo único capaz de analizar eficazmente todas las imágenes de speckle dinámico. Por ello, es necesario probar múltiples algoritmos según la aplicación a analizar. Además, los resultados obtenidos con los descriptores propuestos varían en función de los parámetros de cada algoritmo. Es decir, la propuesta ofrece múltiples resultados, lo cual es ventajoso, ya que permite un análisis más completo y adaptado a cada situación física específica.

3.2 **Subjetividad en la evaluación visual humana** La percepción humana varía entre individuos, lo que puede generar determinaciones subjetivas sobre la calidad de las imágenes resultantes, incluso sin una comparación directa con las imágenes originales. Esta variabilidad introduce sesgos, exacerbados por la tendencia del cerebro humano a identificar patrones y realizar juicios basados en preferencias personales.

Por lo mencionado, diseñar algoritmos objetivos capaces de seleccionar la mejor imagen sin referencia es un desafío importante. El uso de técnicas de aprendizaje automático no supervisado puede mitigar estos sesgos y proporcionar evaluaciones más objetivas reduciendo la influencia de los sesgos subjetivos y lograr evaluaciones más coherentes y precisas de la calidad de las imágenes.

3.3 **Manejo de grandes volúmenes de datos en experimentos multiespectrales** El almacenamiento de imágenes de *speckle* dinámico generadas iluminando la muestra con distintas longitudes de onda genera una gran cantidad de datos a procesar. A su vez las imágenes resultantes dependen de la selección de los parámetros de ajuste en los algoritmos propuestos (tales como ángulos y tablas de búsqueda (*lookup tables*, LUTs) [9]). El gran número de resultados posibles hace que la exploración manual de todas las combinaciones posibles sea impráctica y consuma demasiado tiempo.

Por ejemplo, utilizando cuatro longitudes de onda (azul, rojo, verde e infrarrojo) y tres algoritmos ajustables, cada uno con 180 ángulos posibles, además de la aplicación de tres LUTs adicionales, se generan 6480 imágenes diferentes. Para obtener una imagen RGB final, es necesario seleccionar tres imágenes de este conjunto. La cantidad de combinaciones posibles para elegir tres imágenes de un total de 6480 es de **45.328.638.960**.

Este enorme número de combinaciones demuestra la necesidad de automatizar el proceso de selección de imágenes para agilizar el análisis. La automatización permite a los investigadores enfocarse en la interpretación de las imágenes seleccionadas y en la extracción de conclusiones significativas de manera más eficiente.

Superando limitaciones

Para abordar las limitaciones detalladas anteriormente, proponemos explorar la programación basada en inteligencia artificial. La integración de inteligencia artificial permite superar las limitaciones de la programación estructurada, proporcionando herramientas avanzadas para la evaluación objetiva de imágenes, la selección automatizada de resultados y la mejora en la detección de objetos ocultos en imágenes de *speckle entre otras aplicaciones* [12-14].

Aprovechando técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, es posible desarrollar algoritmos capaces de manejar la complejidad y variabilidad de las imágenes de *speckle dinámico*. En particular, verificaremos que estos enfoques basados en IA ofrecen métodos más flexibles y efectivos para detectar las mejores imágenes de objetos ocultos, optimizando la relación costo-beneficio del proceso de detección.

Selección optimizada de imágenes mediante aprendizaje no supervisado

En este trabajo, proponemos una tarea de aprendizaje no supervisado basada en el análisis de agrupamiento (clustering) [11]. La técnica de agrupamiento se utiliza para identificar grupos de imágenes reconstruidas de alta calidad dentro de un conjunto de datos sin etiquetar. Para ello, implementamos el algoritmo de agrupamiento K-Means para la clasificación de imágenes, como se ilustra en la Figura 2.

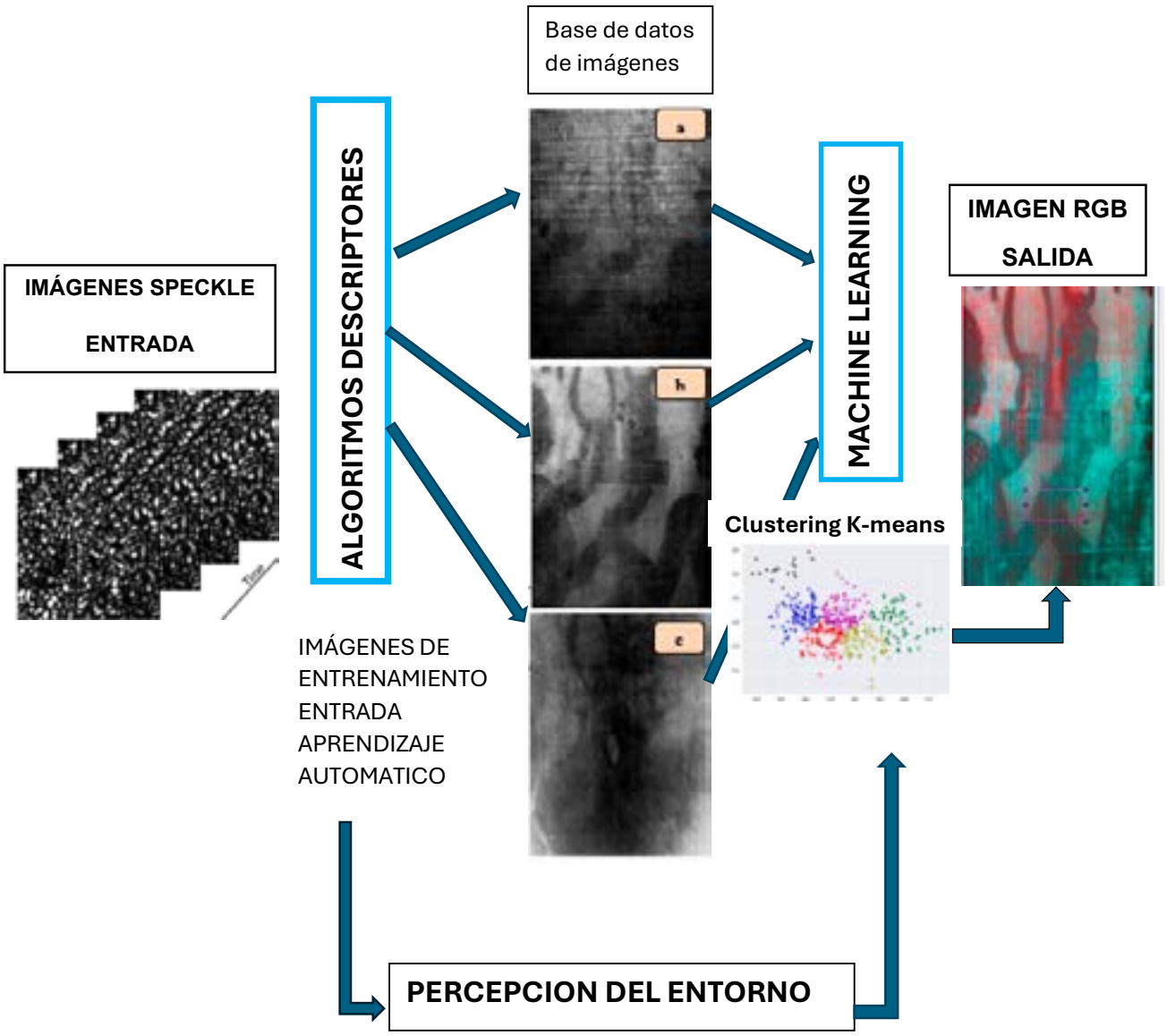


Figura 2: Esquema de la implementación de la arquitectura 'AI Agent' para el caso de comparación no supervisada (entorno, acciones, agente AI). La base de datos de imágenes son las imágenes obtenidas como muestras de los diferentes algoritmos descriptores y diferentes longitudes de onda de iluminación. Imagen RGB de salida es la imagen reconstruida seleccionada empleando clustering K-means

Implementación del algoritmo K-Means para clasificación de imágenes

El algoritmo K-Means es una técnica ampliamente utilizada que busca dividir un conjunto de datos en K agrupaciones, donde K es un número predefinido. Se asignan puntos de datos al centroide más cercano y se actualizan los centroides hasta alcanzar la convergencia.

En nuestro caso, aplicamos el algoritmo K-Means para clasificar las imágenes recuperadas a partir de los experimentos de speckle dinámico con múltiples longitudes de onda y algoritmos descriptores con parámetros ajustables. Este algoritmo analiza los valores de los píxeles o las características de las imágenes y las agrupa en K categorías según su similitud.

En las Figuras 3, se muestran las distancias euclidianas desde los centroides hasta las asignaciones de los clusters. Estas distancias cuantifican la diferencia entre cada imagen y los centroides de los clusters identificados. Al calcular estas distancias, el algoritmo asigna cada imagen a su cluster correspondiente.

Los resultados obtenidos demuestran que la clasificación automática de imágenes mediante K-Means permite identificar aquellas con mayor calidad de recuperación de objetos ocultos. Por lo tanto, este proceso reduce la dependencia de la evaluación subjetiva y proporciona un método más objetivo para seleccionar los mejores resultados en los experimentos de speckle dinámico.



Figura 3: Gráfico de resultados de K-Means con 6 clústeres. Los números son la distancia más corta, para cada uno de los 6 clusters. La suma permite saber qué cluster es más denso sumando la distancia de cada imagen a su centroide. Luego dentro de esa suma se extrae la distancia mínima al centroide. Min (Σ Cn distancia). Los números corresponden al cálculo, con los datos de los grupos. La distancia 1 proviene de la distancia C1 y así sucesivamente con los 6 clusters.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos demostrado la viabilidad del uso de la técnica de speckle dinámico con múltiples longitudes de onda junto con algoritmos ajustables para la recuperación de dibujos ocultos en papiro. La propuesta permite obtener imágenes reconstruidas de diferente calidad cuando se varían los parámetros de cada algoritmo y la longitud de onda de los láseres.

La aplicación de inteligencia artificial en el análisis de las imágenes permitió un enfoque más objetivo y automatizado en la selección de los mejores resultados, reduciendo la necesidad de evaluaciones manuales intensivas. La integración del algoritmo K-Means facilitó la clasificación de las imágenes recuperadas, permitiendo la identificación automática de aquellas con mayor calidad.

Los resultados obtenidos permiten verificar que el método propuesto representa una técnica versátil y prometedora para la visualización de objetos ocultos. Esto lo convierte en una herramienta de gran utilidad en arqueología. El enfoque desarrollado también puede extenderse a otras áreas de interés, el estudio de pinturas rupestres, cráneos pintados otros objetos arqueológicos y artísticos, análisis de obras de arte y otros campos relacionados, así como en la detección de inhomogeneidades subyacentes en materiales diversos.

Agradecimiento

Este trabajo fue patrocinado parcialmente por: Facultad de Ingeniería, Universidad de La Plata Grant I266, Agencia Nacional Promoción Científica y Tecnológica ANPCyT Grant PICT N◦ 4558 and PICT-2021-CAT-I-00074. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas PIP No. 11220220100080CO, Argentina.

Referencias

[1] E. Miles, A. Roberts, “Non-destructive speckle imaging of subsurface detail in paper-based cultural materials”, Optics Express 17, 12309-12314, (2009).

[2] N. Hagen, M. W. Kudenov, “Review of snapshot spectral imaging technologies”, Optical Engineering. 52, 090901, (2013).

[3] Ran, Lingyan; Zhang, Yanning; Wei, Wei; Zhang, Qilin, “A Hyperspectral Image Classification Framework with Spatial Pixel Pair Features”, Sensors 17, 2421, (2017).

[4] E. Stoykova, G. Mateev, B. Blagoeva, B. Ivanov, D. Nazarova, L. Nedelchev, “Dynamic speckle analysis with two-wavelength acquisition”, Proc. SPIE 11338, AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology, 113383M (2019).

[5] Y. Aizu, T. Asakura, ‘‘Biospeckle,’’ Chap. 2 in “Trends in Optics”, A. Consortini, Ed., Academic Press (1996).

[6] H. Rabal, R. Braga, Eds. “Dynamic laser speckle and applications”. CRS Press, Taylor and Francis (2009).

[7] L. I. Passoni, A. L. Dai Pra, G.H. Sendra, H. J. Rabal, M. Trivi, "Signal Feature Extraction Using Granular Computing. Comparative analysis with frequency and time descriptors applied to dynamic laser speckle patterns", International Journal of Computational Intelligence Systems. 8, Supplement 2, 28-40, (2015).

[8] A. L. Dai Pra, M. A. González, M. N. Guzmán, A. G. Scandurra, G. J. Meschino, L. I. Passoni, N. L. Cap, H. J. Rabal, M. Trivi, “Comparison of algorithms for descriptor computation in activity speckle images”. Proceeding of the 24 th. General Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), (2017).

[9] L. Buffarini, H. Rabal, N. Cap, E. Grumel, M. Trivi, P. Finger, “Tuneable algorithms for tracking activity images in dynamic speckle applications”, Optics and Lasers in Engineering 129, 106084, (2020).

[10] N. L. Cap, H. Rabal, E. Grumel, L. Buffarini, M. Trivi, M. Avendaño Montecinos, E. Baradit Allendes, “Activity speckle images obtained from box fractal formalism”, Optics and Lasers in Engineering 121, 334–339, (2019).

[11] G. Hackeling, “Mastering Machine Learning with scikit-learn”. Packt Publishing Ltd (2014).

[12] Qiang Fang, Qian Li, Qinghe Song, Silvio Montresor, Pascal Picart, Haiting Xia, “Convolutional and Fourier neural networks for speckle denoising of wrapped phase in digital holographic interferometry”. Optics Communications 550, (2024).

[13] Yair Rivenson, Yichen Wu, Aydogan Ozcan, “Deep learning in holography and coherent imaging”. Light Sci Appl 8, 85, (2019).

[14] Leandro Buffarini, E E Grumel, Myrian C Tebaldi, “Detection of hidden drawings using multi-wavelength dynamic speckle, tuneable algorithms, and unsupervised learning”. Journal of Optics 26, 125703, (2024).



CNIAELECTROTECNIAELE

REVISIÓN DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CABLES ELÉCTRICOS ANTE SOBRECARGAS

Arrojo, Carlos D., Frene, Horacio M., Dias, Ricardo, Herlein, Matías E.,
Nastta, Hernán A., Scaramutti, José C.

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

Resumen

En este trabajo se hace la deducción de la expresión matemática del calentamiento en régimen transitorio de un cable, obteniéndose una expresión para la constante de tiempo térmica y se compara el resultado obtenido, con el indicado en la Norma ANSI/IEEE Std 242-1986 [1]. Además, se presentan los resultados de dos experiencias realizadas con un cable unipolar de 95 mm^2 de cobre aislado en PVC.

Palabras clave: Cables aislados – Calentamiento – Corriente de Sobrecarga - Transitorio de temperatura.

1. Introducción

Cuando se trabaja con cables eléctricos aislados (así como en otros equipos eléctricos), es posible analizar tres estados de funcionamiento, el régimen permanente relacionado con una corriente que hace que el cable tome una temperatura estable, el régimen de emergencia o sobrecarga y el de cortocircuito.

A cada uno de estos estados de funcionamiento se le asigna una temperatura de trabajo máxima. Así, habitualmente, para un aislamiento de XLPE, la temperatura de trabajo de régimen permanente es de $90\ °C$, la de emergencia es $130\ °C$ y la de cortocircuito de $250\ °C$.

En el caso en que el régimen de emergencia requiera ser analizado, se debe disponer del valor de la constante de tiempo térmica del cable en su forma de instalación. Este dato no aparece normalmente en los catálogos de cables y se debe recurrir a valores estimativos [1]. En este trabajo se analiza el régimen de emergencia o sobrecarga, obteniéndose una expresión que vincula la corriente de emergencia con el tiempo de desconexión, para una dada temperatura admisible, además se presenta una forma simple de estimar la constante de tiempo térmica y se hacen un par de verificaciones experimentales de comprobación.

2. Temperatura en Estado de Emergencia

El estado de emergencia se caracteriza por tener una duración limitada, el final del mismo se presenta cuando la temperatura del aislante alcanza la temperatura máxima admisible para el estado de sobrecarga (que no es el estado estacionario), que para el caso del polietileno reticulado (XLPE) y la goma etilopropilenica (EPR) es de $130\ °C$ y para el policloruro de vinilo (PVC) es $85\ °C$. El tiempo que demora en llegar a esta condición depende de la corriente de emergencia (I_E) y de la constante de tiempo del cable en la condición de instalación.

Para obtener la expresión matemática de la temperatura en función del tiempo, se plantea la ecuación que vincula la energía entrante y saliente del cable:

$$I_E{}^2 R\ dt = \delta\ v\ c\ d(\Delta T) + k\ S\ \Delta T\ dt$$

$$R = R_a(1 + \alpha\ T) = R_a\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T)\big)$$

$$I_E{}^2 R_a\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T)\big)dt = \delta\ v\ c\ d(\Delta T) + k\ S\ \Delta T\ dt \qquad (1)$$

Donde:

: corriente de emergencia
R_a: Resistencia del cable a la temperatura de $0\ °C$
R : Resistencia del cable a la temperatura T
T : Temperatura del cable
α : Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura a $0\ °C$, $1/234{,}5\ [1/°C]$
T_0 : Temperatura ambiente
δ : Densidad del material conductor
v : volumen
c : calor específico del material conductor
k : coeficiente de intercambio de calor del cable con el medio
S : superficie exterior del cable
ΔT : Sobreelevación de temperatura del cable respecto de T_0
$d(\Delta T)$: Diferencial de sobreelevación de temperatura

El primer término representa la energía de pérdidas en el cable, el primer sumando del segundo término, la energía necesaria para elevar la temperatura del cable, mientras que el segundo sumando, la energía disipada (ley de enfriamiento de Newton).

Si la corriente de emergencia se mantiene durante un tiempo suficiente como para que la temperatura del cable llegue al estado estacionario, toda la energía que entra por pérdidas debe disiparse al ambiente, la ecuación (1) para este estado queda:

$$I_E{}^2 R_a\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T_{máx})\big) = k\ S\ \Delta T_{máx}$$

Es de hacer notar que $\Delta T_{máx}$ es la sobreelevación de temperatura que alcanzaría el cable en régimen estacionario si se mantuviera I_E circulando por él. En realidad, este valor no será alcanzado porque la carga se deberá eliminar cuando la temperatura alcance el valor máximo admitido para tal estado.

De esta ecuación es posible despejar $I_E{}^2\ R_a$ y reemplazar este producto en (1)

$$\frac{k\ S\ \Delta T_{máx}}{\big(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx})\big)}\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T)\big)dt = \delta\ v\ c\ d(\Delta T) + k\ S\ \Delta T\ dt$$

Arreglando esta última nos queda:

$$\frac{k\ S\ \Delta T_{máx}}{\big(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx})\big)}\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T)\big)dt - k\ S\ \Delta T\ dt = \delta\ v\ c\ d(\Delta T)$$

$$kS\left\{\frac{\Delta T_{máx}}{\big(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx})\big)}\big(1 + \alpha(T_0 + \Delta T)\big) - \Delta T\right\} dt = \delta\ v\ c\ d(\Delta T)$$

$$kS\left\{\frac{\Delta T_{máx}+\alpha T_0 \Delta T_{máx}+\alpha\,\Delta T\,\Delta T_{máx}-\Delta T-\Delta T\alpha T_0-\Delta T\alpha\Delta T_{máx}}{(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx}))}\right\}\,dt=\delta\,v\,c\,d(\Delta T)$$

$$kS\left\{\frac{\Delta T_{máx}+\ \alpha T_0\Delta T_{máx}+\alpha\,\Delta T\,\Delta T_{máx}-\Delta T-\Delta T\alpha T_0-\Delta T\alpha\Delta T_{máx}}{\left(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx})\right)}\right\}dt=\delta\,v\,c\,d(\Delta T)$$

$$kS\left\{\frac{\Delta T_{máx}\,(1+\alpha T_0)-\Delta\mathrm{T}\,(1+\alpha T_o\,)}{(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx}))}\right\}\,dt=\delta\,v\,c\,d(\Delta T)$$

$$kS\left\{\frac{(1+\alpha T_0)\,(\,\Delta\mathrm{T}_{\,máx}-\Delta T)}{(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx}))}\right\}\,dt=\delta\,v\,c\,d(\Delta T)$$

$$dt=\frac{\delta\,v\,c\left(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx})\right)}{(1+\alpha T_0)\,kS}\,\frac{d(\Delta T)}{(\,\Delta\mathrm{T}_{\,máx}-\Delta T)}$$

Llamando:

$$K=\frac{\delta\,v\,c\,(1+\alpha(T_0+\Delta T_{máx}))}{(1+\alpha T_0)\,kS}\qquad(2)$$

Constante de tiempo térmica, nos queda:

$$dt=K\,\frac{d(\Delta T)}{(\,\Delta\mathrm{T}_{\,máx}-\Delta T)}$$

La solución de esta ecuación diferencial toma la forma:

$$\Delta T=\Delta T_{máx}\,(1-\exp\,(-{}^{t}/_{K}))$$

Y llamando ΔT_E, variación de temperatura de emergencia

$$\Delta T_E=\Delta T_{máx}\,(1-\exp\,(-{}^{t}/_{K}))$$

Nota: En esta última se ha utilizado *t* como el tiempo en el cual se alcanza ΔT_E, para mantener la nomenclatura de la norma de referencia [1].

$\Delta T_{máx}$: variación máxima de temperatura respecto del ambiente a la que se llegaría si se mantuviera I_E

Si consideramos que antes de presentarse la condición de emergencia (I_E) , por el cable se encuentra circulando una corriente (I_0) que lo ha hecho llegar a una temperatura estable (T_{reg}), nos queda:

$$T_E-T_0=\Delta T_{reg}+\left(\Delta T_{máx}-\Delta T_{reg}\right)\,(1-\exp\,(-{}^{t}/_{K}))$$

Esta última se puede escribir de la forma:

$$T_E-T_0=\Delta T_{máx}(1-\exp(-{}^{t}/_{K})+\Delta T_{reg}\exp(-{}^{t}/_{K})\qquad(3)$$

Si aplicamos la ecuación (1) a los estados permanentes correspondientes a I_E *e* I_0, donde todo el calor ingresado por pérdidas se disipa, nos quedan dos ecuaciones de donde será posible despejar $\Delta T_{máx}$ *y* ΔT_{reg}:

$$I_E{}^2 R_a(1+\alpha T_{máx}) = k\ S\ \Delta T_{máx}$$

y

$$I_0{}^2 R_a\left(1+\alpha T_{reg}\right) = k\ S\ \Delta T_{reg}$$

Despejando $\Delta T_{máx}$ *y* ΔT_{reg} y reemplazando en la ecuación (3)

$$T_E - T_0 = \frac{\mathrm{I}_E{}^2 R_a}{kS}\ (1+\alpha T_{máx})(1-\exp\left(-{}^t/_K\right) + \frac{\mathrm{I}_0{}^2 R_a}{kS}\ \left(1+\alpha T_{reg}\right)\exp\left(-{}^t/_K\right)$$

El término $\frac{R_a}{kS}$ se puede obtener aplicando nuevamente la expresión (1) pero al régimen nominal:

$$I_N{}^2 R_a(1+\alpha T_N) = k\ S\ \Delta T_N = kS\ (T_N - T_{0máx}) \qquad (4)$$

Quedando finalmente:

$$T_E - T_0 = \frac{\mathrm{I}_E{}^2 (T_N - T_{0máx})}{I_N{}^2(1+\alpha T_N)}(1+\alpha T_{máx})(1-\exp\left(-{}^t/_K\right) + \frac{\mathrm{I}_0{}^2 (T_N - T_{0máx})}{I_N{}^2(1+\alpha T_N)}(1+\alpha T_{reg})\exp\left(-{}^t/_K\right)$$

Si de esta expresión despejamos I_E y lo referimos a I_N, nos queda:

$$\frac{T_E - T_0}{(T_N - T_{0máx})} = \frac{\mathrm{I}_E{}^2}{I_N{}^2}\frac{(1+\alpha T_{máx})}{(1+\alpha T_N)}(1-\exp\left(-{}^t/_K\right) + \frac{\mathrm{I}_0{}^2}{I_N{}^2}\frac{(1+\alpha T_{reg})}{(1+\alpha T_N)}\exp\left(-{}^t/_K\right)$$

$$\frac{I_E}{I_N} = \sqrt{\frac{\frac{T_E - T_0}{T_N - T_{0máx}} - \left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2 \frac{(1+\alpha T_{reg})}{(1+\alpha T_N)}\exp\left(-{}^t/_K\right)}{\left(1-\exp\left(-{}^t/_K\right)\right)}\frac{(1+\alpha T_N)}{(1+\alpha T_{máx})}} \qquad (5)$$

Si en esta última se toma $\alpha = 1/230\ [1/°\mathrm{C}]$ y se aproxima $T_{reg} = T_N$

Queda finalmente:

$$\frac{I_E}{I_N} = \sqrt{\frac{\frac{T_E - T_0}{T_N - T_{0máx}} - \left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2 \exp\left(-{}^t/_K\right)}{\left(1-\exp\left(-{}^t/_K\right)\right)}\frac{(230+T_N)}{(230+T_{máx})}} \qquad (6)$$

Esta expresión es muy similar a la que aparece en la página 269 de la referencia [1]. Posee dos diferencias, en el denominador del primer término del numerador del radicando de la ecuación (6) aparece $T_{0máx}$, mientras que en la ecuación correspondiente de la referencia [1] aparece T_0, y en el denominador aparece $(230 + T_{máx})$, mientras que en la referencia [1] $(230 + T_E)$.

Para los casos analizados, se presentan diferencias importantes aplicando una u otra expresión.

3. Constante de Tiempo Térmica

Se puede ver que la constante de tiempo térmica K, tiene dos partes, una que depende de las constantes físicas y otra que depende de la temperatura ambiente y de la temperatura máxima, la (2) se puede escribir:

$$K = \frac{\delta\, v\, c\, \left(1 + \alpha(T_{máx})\right)}{(1 + \alpha T_0)\, kS} = \frac{\delta\, v\, c}{kS} * \frac{\left(1 + \alpha(T_{máx})\right)}{(1 + \alpha T_0)} \qquad (7)$$

Recordemos que T_{max} es la máxima temperatura a la que llegaría el cable si se mantuviera I_E.

reemplazando el volumen del cable por:

$v = s\, l$

s: sección del cable

l: longitud del cable

y de la ecuación (4) despejamos:

$$kS = \frac{{I_N}^2\, R_a(1 + \alpha T_N)}{\Delta T_N} = \frac{{I_N}^2\, \rho_a\, l\, (1 + \alpha T_N)}{s\, \Delta T_N}$$

donde:

ρ_a: resistividad a 0 °C

Reemplazando en (7):

$$K[h] = 0{,}0591\, (\frac{s}{I_N})^2\, \frac{\Delta T_N}{(1 + \alpha T_N)}\, \frac{(1 + \alpha T_{máx})}{(1 + \alpha T_0)} \qquad [8]$$

con: $s(mm^2); I_N(A);\ T\ y\ \Delta T$ (°C)

Donde la constante se ha obtenido utilizando los siguientes valores:

ρ_a= 16,1x10-9 Ωm, resistividad del cobre a 0 °C

c= 0,107 Wh/kg°C, calor específico del cobre

δ= 8,9 x 10-6 kg/mm3 , densidad del cobre

En la expresión (8) se ve que la constante de tiempo térmica depende no solo de las características del cable, sino también de la temperatura ambiente y de la corriente de emergencia, a través de $T_{máx}$.

4. Verificación Experimental

Se realizó una verificación experimental utilizando un cable de PVC, de cobre de 95 mm², a 3 veces la corriente nominal del mismo y con precarga nula, con los siguientes datos:

$T_{0máx} = 40$ °C

$T_N = 70\ ℃$

$T_0 = 20{,}8\ ℃$, temperatura ambiente durante la experiencia

$I_E = 834\ A$

$T_E = 73{,}8\ ℃$, (por comodidad para la experiencia se tomó un valor menor al máximo admisible para el PVC)

Aplicando la ecuación (1) a los estados permanentes correspondientes a $I_E\ e\ I_N$, donde todo el calor ingresado por pérdidas se disipa, nos quedan dos ecuaciones de donde será posible despejar $\Delta T_{máx}\ y\ \Delta T_N$ (esta última conocida, $70\text{-}40{=}30\ ℃$ para PVC):

$$I_E{}^2 R_a(1 + \alpha T_{máx}) = k\ S\ \Delta T_{máx} = kS(T_{máx} - T_0)$$

$$I_N{}^2 R_a(1 + \alpha T_N) = k\ S\ \Delta T_N = kS(T_N - T_{0máx})$$

Combinando ambas, queda:

$$I_E{}^2 = I_N{}^2\ \frac{(1+\alpha T_N)}{(T_N - T_{0máx})}\ \frac{(T_{máx} - T_0)}{(1+\alpha T_{máx})} \qquad (9)$$

Esta expresión vincula la corriente de emergencia con la temperatura máxima $T_{máx}$ a la que llegaría el cable si esta corriente se mantuviese hasta llegar al equilibrio térmico.

Como para nuestra experiencia se tomó:

$I_E = 834\ A$ (tres veces la corriente nominal)

De la (9) se obtiene:

$T_{máx} = 2019\ °C$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (8), resulta:

$K = 5066\ s$

Despejando t de la (5) con $T_E = 73{,}8\ °C$, (valor experimental), se obtiene que el cable llegaría a esta temperatura en $136\ s$.

En la Figura 1 se muestran: el resultado de la verificación experimental (curva de trazo lleno) y la curva teórica (curva de trazos). La curva experimental representa el ΔT_{medido} en función del tiempo respecto del ambiente a $20{,}8\ ℃$. Cuando la temperatura alcanzó $73{,}8\ ℃$ ($\Delta T_E = 73{,}8\text{-}20{,}8 = 53{,}0\ ℃$), la fuente se desconectó, este tiempo de desconexión fue $170\ s$ (diferencia de $34\ s$ respecto de valor teórico).

Es de hacer notar que, si se utiliza la expresión que da la norma de referencia [1], para los mismos valores de entrada, utilizando la misma constante de tiempo térmica, se obtiene un tiempo de desconexión de $633\ s$.

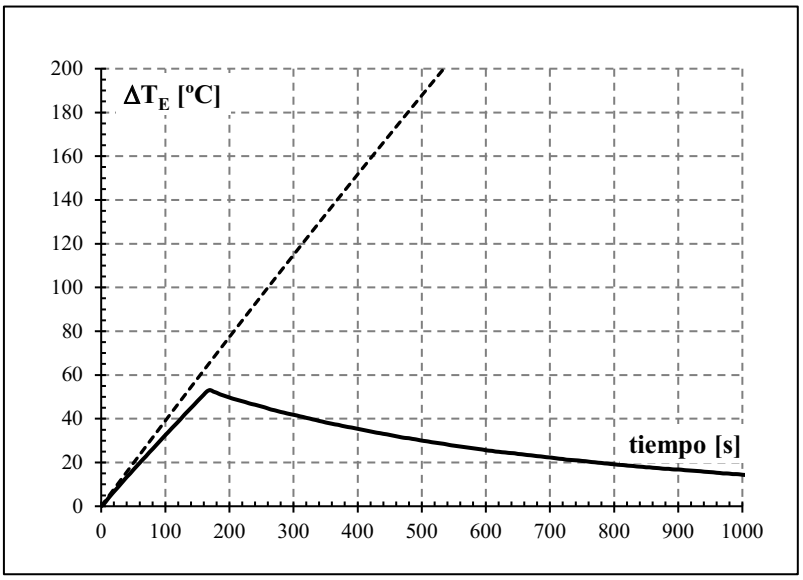


Figura 1

5. Verificación Experimental Adicional

Se realizó una verificación experimental adicional utilizando el mismo cable, pero con una corriente del orden de la nominal, con los siguientes datos:

$I_N = 278\ A$

$T_{0máx} = 40$ ℃

$T_N = 70\ °C$

$T_0 = 21{,}5$ ℃, temperatura ambiente durante la experiencia

$I_E = 250\ A$

De la (9) se obtiene $T_{máx} = 43{,}7\ °C$, que corresponde a:

$\Delta T_{máx} = 43{,}7 - 21{,}5 = 22{,}2\ ºC$

Con este valor y con la (8), se calcula la constante de tiempo térmica para este estado de carga:

$K = 624\ s$

Con los valres aobtenidos se construye la curva exponencial teórica (curva de trazos) que se superpone a la exponencial medida (curva de trazo lleno) en la Figura 2.

Se puede ver que, al igual que en el caso anterior, la constante de tiempo térmica real es mayor que la teórica, arrojando resultados conservativos.

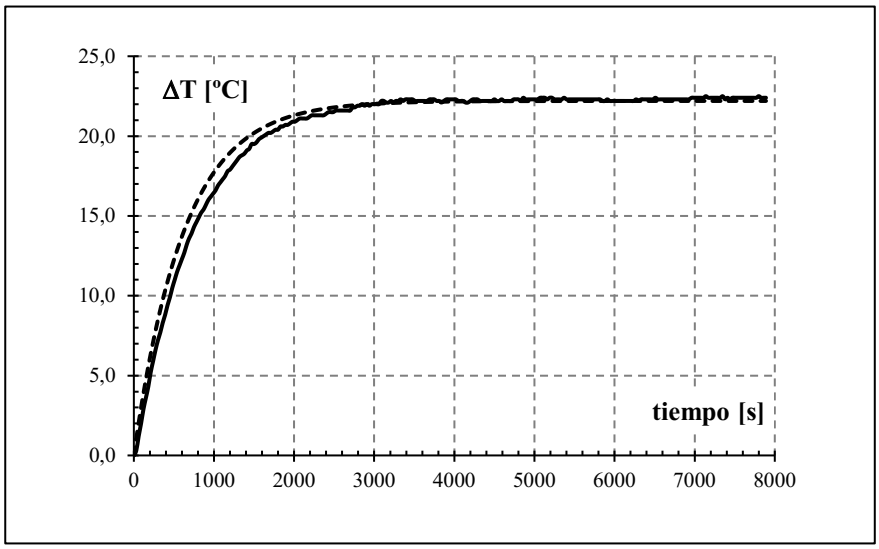


Figura 2

6. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado el análisis de la temperatura de un cable en función del tiempo, para una dada corriente, con el objetivo de obtener el tiempo de desconexión para el caso que la corriente sea una sobrecarga (corriente ligeramente mayor que la nominal).

Se ha obtenido una expresión simple y rápida de usar para la constante de tiempo térmica, y se ha realizado una verificación experimental con resultado razonable (diferencia de 20 % entre el valor del tiempo de desconexión teórico y el experimental).

Resta hacer verificaciones adicionales utilizando precarga y para distintas secciones y tipos de cables.

Por último, se han obtenido diferencias no menores respecto de la norma de la referencia [1], las que se han dejado indicadas.

7. Referencias

[1] ANSI/IEEE Standard 242-1986, “Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”.

DESARROLLO DE UNA RED DE CLASIFICADORES DE TRÁNSITO DISTRIBUIDA EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Pablo A. García[1], Marcelo A. Haberman[1], Federico N. Guerrero[1], Enrique M. Spinelli[1], Matías Oliva[1], Marcos Antonelli[1], Mario Aguirre[2], Mariano Lavechia[2]

[1]Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control e Instrumentación LEICI (UNLP-CONICET-CIC), Facultad de Ingeniería - UNLP.

[2]Dirección de Vialidad, Provincia de Buenos Aires (DVBA)

pagarcia@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Este trabajo describe el desarrollo e implementación de una red de clasificadores de tránsito que se enmarca en un convenio celebrado entre la Facultad de Ingeniería de la UNLP y la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA). Las tareas objeto del convenio se llevaron adelante por medio del Grupo de Instrumentación Biomédica, Industrial y Científica (GIBIC) perteneciente al Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI). Este desarrollo permitió sustituir importaciones, con varios beneficios asociados para ambas instituciones. Por el lado de la DVBA, ahorro económico, contar con soporte local, capacitación para su personal y una interfaz de operación diseñada a su medida. Por el lado de la facultad, permitió incorporar conocimiento en la línea de investigación en “sistemas embebidos”, siendo una excelente oportunidad para verificar estrategias en situaciones reales de funcionamiento y proponer soluciones originales que pueden dar lugar a innovaciones.
En este trabajo se presenta el diseño de una red propia de clasificadores de tránsito del tipo inductivo [1] que está formada por 15 equipos distribuidos en distintos puntos de la provincia de Buenos Aires. Es importante destacar que el personal de la Facultad posee experiencia en el desarrollo de este tipo de equipamiento [2, 3, 4]. Aun así, se realizó un nuevo diseño con componentes y tecnologías actuales. Los equipos disponen de un sistema de comunicación que permite descargar la información almacenada, visualizar su operación en tiempo real y reprogramar el equipo de manera remota. La utilización de este sistema permite reducir el número de viajes, los gastos de movilidad y combustible involucrados en el mantenimiento de la red. Además, permite utilizar más eficazmente el recurso humano especialmente entrenado para estas tareas.

2. Implementación

2.1. Estaciones autónomas: Teoría de operación

Las estaciones autónomas que conforman la red son clasificadores de tránsito del tipo inductivos. Estas estiman la velocidad y largo de los vehículos guardando información temporal sobre la detección de los mismos. Para poder determinar la velocidad y el largo, se requieren dos espiras (A y B) de largo L_E, separadas una distancia L, tal como se muestra en la Figura 1 (a). Ante el paso de un rodado, las espiras entregan las señales indicadas en la Figura 1 (b), a partir de las cuales es posible determinar:

T_{AB}: tiempo que transcurre entre la detección del vehículo en la espira A y en la B.

T_{AA}: tiempo que el vehículo permanece sobre la espira A [2]. Midiendo estas variables, es posible determinar la velocidad v y el largo L_V del vehículo según:

$$v = \frac{L}{T_{AB}}$$

$$L_V = \frac{T_{AA}}{v} - L_E$$

De este modo se estima la velocidad y el largo de cada vehículo para su clasificación por largo y por velocidad.

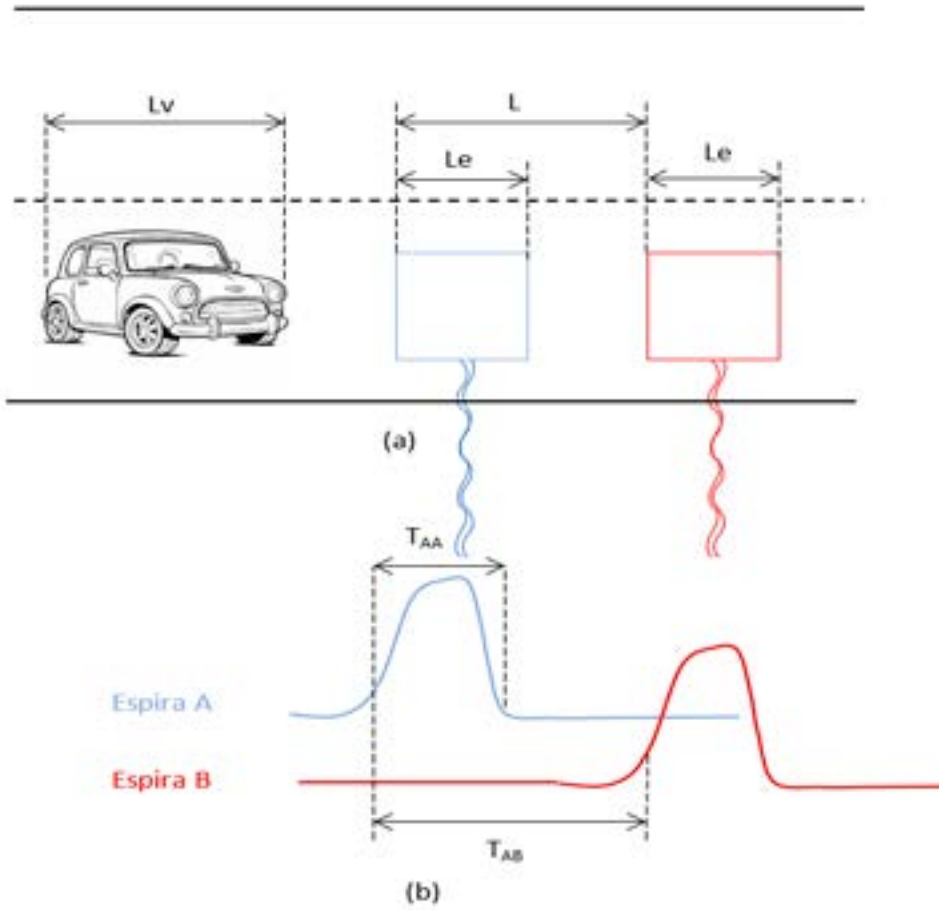


Figura 1. (a) Esquema general de instalación y (b) señales utilizadas en clasificadores

En la Figura 2 se puede observar la disposición de las espiras en una instalación de la DVBA.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Esquema de espiras en autovía y (b) Esquema de espiras en ruta

2.2. Clasificación Supervisada

Para validar la operatoria de los nodos se realizaron salidas de campo a la estación que dispone la DVBA sobre la Avenida 60 en el camino a Berisso.

En la Figura 3 se puede observar la configuración de medida utilizada. En la parte superior izquierda se visualiza la salida por consola de la placa sensora. En la parte inferior izquierda la forma de onda producida por cada vehículo sobre las espiras y en la parte derecha una captura de video para tener registro de cada vehículo.

En primera instancia se realizó una validación en tiempo real de la estimación de largo de los vehículos contrastando la salida por consola de la placa de medida con la medida real del vehículo.

Luego de verificar la correcta operación de la placa de medida se decidió registrar la captura de pantalla completa (como se observa en la Figura 3) mediante videos para poder disponer en simultáneo de la imagen de cada vehículo, la firma del mismo y la medida realizada por el equipo ante el pasaje del mismo.

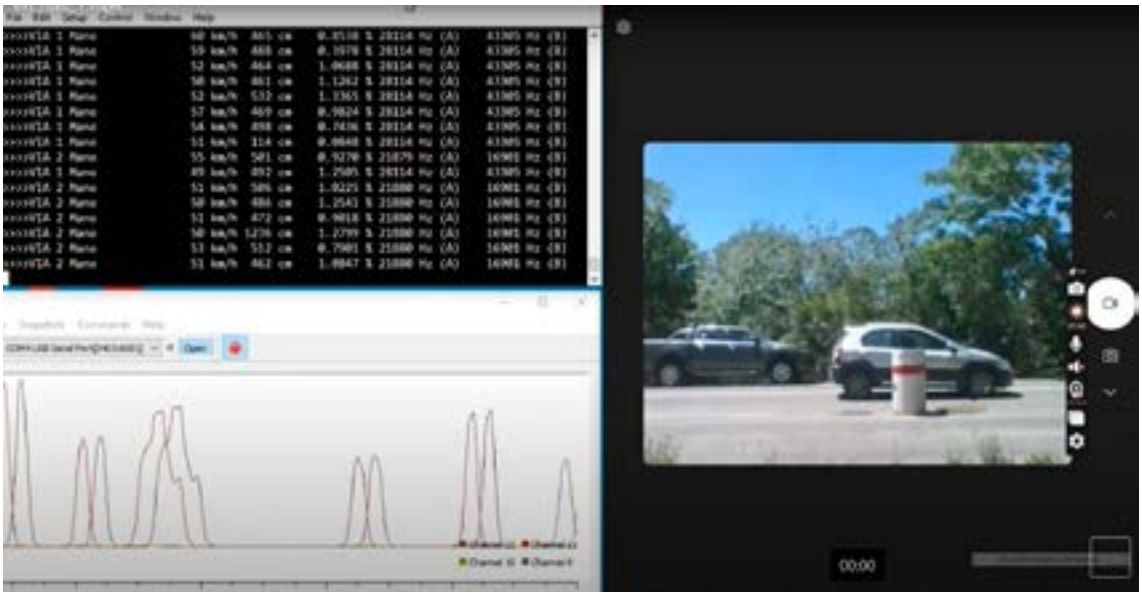


Figura 3. Setup de medida

Mediante dos días de registro en campo se capturaron 10 archivos de video que permitieron generar un banco de datos de 1000 vehículos con clasificación supervisada.

En base al registro generado se realizaron algunos scripts sobre un programa de cálculo numérico para poder visualizar gráficamente información de interés. En la Figura 4 se puede observar un gráfico con la información de largo y desviación de frecuencia para los 1000 vehículos registrados (puntos en color gris) y con los puntos en color para un vehículo en particular. En verde para Peugeot 208 y en azul para ómnibus urbano.

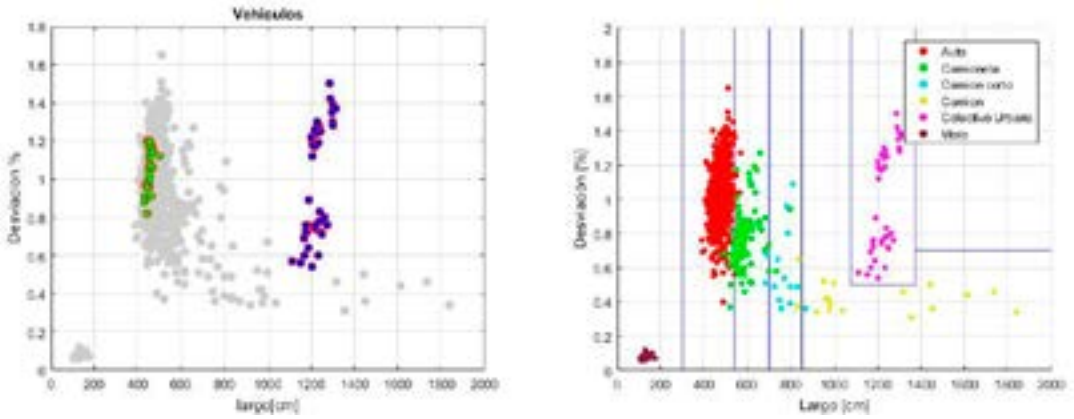


Figura 4.

(a) Largo-desviación. En verde Peugeot 208 - En azul Ómnibus urbano

(b) Categorías propuestas

En base a estas Figuras, se puede observar que la estimación del largo de los vehículos presenta una baja dispersión. No ocurre lo mismo con la desviación, claramente influenciada por la altura del vehículo que presenta variaciones aún para el mismo tipo.

Un detalle que resulta de interés para el caso del ómnibus urbano, en este caso la línea 202, es que se observan dos nubes de puntos claramente diferenciables. Luego de analizar en detalle el video se llegó a la conclusión que la diferencia se debe a distintos modelos de carrocería. El caso que presenta la mayor desviación corresponde a los modelos con piso bajo.

En función de la clasificación supervisada se propusieron las categorías presentadas en la Figura 4 (b).

2.3. Red de Estaciones autónomas

Cada clasificador es capaz de monitorear 2 vías y esto constituye una Estación Autónoma (EA). Las EA pueden reportar datos periódicamente al servidor en la nube (SN). Estos datos se reportan como archivos que contienen información de los últimos 500 vehículos aproximadamente.

Cada EA tiene un código numérico único (Token) que junto a su nombre la identifica y funciona como contraseña para poder depositar sus datos en el servidor en la nube. El resguardo de los datos funciona por triplicado con distintas escalas de tiempo: las EA almacenan los datos en su memoria permanente hasta que deban ser borrados (por el espacio disponible y confiabilidad: semanas a meses). El servidor en la nube almacena su copia por el espacio de meses (dependiendo del plan contratado) y el

almacenamiento permanente ocurre en la estación de visualización y almacenamiento: una computadora en oficinas de la DVBA.

El acceso para visualización y almacenamiento permanente se implementa a través de una aplicación de escritorio compatible con sistemas operativos Windows, que permite acceder al servidor y descargar los archivos manteniendo una copia local del historial completo en disco.

El SN seleccionado es la plataforma Beebotte que ofrece todas las características necesarias para el proyecto y tiene un bajo costo.

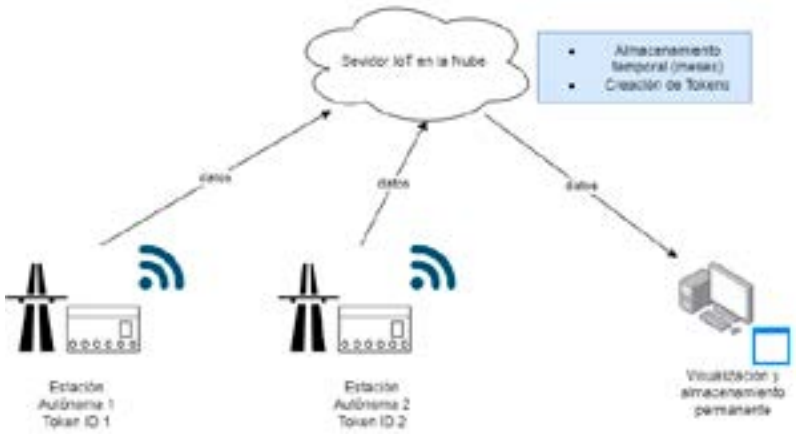


Figura 5. Diagrama esquemático del prototipo de red

2.4. Aplicación de Escritorio

La aplicación de escritorio para la recuperación y visualización de datos presenta una interfaz para seleccionar el rango de datos que se desea examinar filtrando por estación y por fecha.

Al abrir la aplicación, la misma realiza la descarga y actualización de la base de datos con los vehículos detectados por cada EA, así como datos de interés sobre el estado de funcionamiento de cada estación, como el nivel de batería, temperatura, nivel de señal 2G, entre otros.

La propia interfaz presenta un análisis de los vehículos reportados para el rango seleccionado. Al momento, se encuentra implementada la funcionalidad básica de recuperación, clasificación y filtrado de datos. Estas características se coordinan periódicamente con personal de la DVBA para ajustarlo a sus necesidades.



Fig. 8. Captura de inicio de App de Escritorio



Fig. 9. Captura de estadísticas con filtro

3. Resultados y discusión

Se ha logrado implementar parte de la red propuesta, 6 EA sobre un total de 15. Los clasificadores de tránsito implementados han verificado una correcta operatoria en distintas condiciones de campo a lo largo de la Provincia. El primero instalado, en la Avenida 60 camino a Berisso, se encuentra operando ininterrumpida y remotamente desde hace más de 4 meses con un tránsito medio diario (TMD) de 12000 vehículos.

4. Conclusiones

Además de alcanzarse los objetivos propuestos en el Convenio, esto es el desarrollo de una red de clasificadores de tránsito autónomos y con acceso remoto; el trabajo realizado contribuyó al crecimiento del grupo de trabajo en términos cualitativos, aportando una experiencia muy valiosa para las distintas líneas de investigación y docencia llevadas a cabo en el grupo de trabajo (como por ejemplo el desarrollo de electrónica de instrumentación, equipos autónomos y sistemas embebidos, interfaces de usuario, programación orientada a objetos), fortaleciendo así mismo el trabajo en equipo y la interacción entre el personal de las distintas dependencias. Por el lado de la DVBA le ha permitido disponer de un sistema que integra la información de una red de EA en tiempo real con tecnología propia, sustituyendo importaciones a un costo sustancialmente menor.
Es importante destacar que el esquema de red implementado basado en telefonía resulta muy útil, siendo fácilmente reutilizable para recolectar información de cualquier tipo de dispositivos.

5. Bibliografía

1. Lamas Seco, José Juan, “Advanced Techniques for Traffic Monitoring using Inductive Sensors”, Phd Thesis, Universidade da Coruña, Department of Electronics and Systems..

2. D. Guaraglia, E. Spinelli, P. García, R. Vignoni y A. Vázquez, “Equipo para la clasificación de vehículos utilizando lazos inductivos”, *Revista Carreteras.* ISSN 0212-6389, No. 192, pp. 82-90, 2013.

3. D. Guaraglia, E. Spinelli, P. García y A. Vazquez, “Desarrollo innovador de un equipo para la clasificación de vehículos utilizando lazos inductivos,” XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, IX Congreso Internacional ITS, Córdoba, Argentina, 2012.

4. E. Spinelli, P. Garcia, D. Guaraglia. “Uso combinado de sensores de ejes y lazos inductivo para mejorar la calidad de clasificación en estudios de tránsito”. XIV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires, 2005.

SIMULADOR DINAMICO ORIENTADO AL CONTROL DEL CRECIMIENTO DE CULTIVOS DE MICROALGAS EN FOTOBIORREACTORES TIPO RACEWAY

Valenciaga Fernando, Nuñez Sebastian, Inthamoussou Fernando A., Castañeda Teresita

Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Depto. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería - UNLP, calle 48 y 116 s/n. e-mail: fval@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

La optimización del cultivo de microalgas ha recibido mucha atención en los últimos años debido al potencial que presentan como elementos primarios de diversos productos industriales. Algunos ejemplos actuales que pueden citarse son el uso de su biomasa en productos farmacéuticos, alimentos balanceados de consumo animal, cosméticos, etc., aunque su atractivo a futuro reside en constituirse como materia prima principal de la producción de biodiesel. Este último objetivo presenta muchas ventajas frente a las opciones usadas actualmente ya que en general las microalgas tienen una tasa de crecimiento superior frente a granos como la soja o el maíz, requieren una menor ocupación del suelo, no necesitan ubicaciones con suelo fértil y no son fuente de alimentación humana. Por otro lado, su proceso de fotosíntesis es un alto consumidor de carbono por lo que su cultivo también puede usarse como depurador de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) [1][2][3].

El cultivo industrial de microalgas se realiza en general en dos tipos de instalaciones diferentes seleccionadas de acuerdo con la utilización que se le vaya a dar al producto final (ver Figura 1). En el caso en que la biomasa o sus ácidos grasos sean usados como elementos de productos farmacéuticos, el cultivo suele realizarse en fotobiorreactores cerrados construidos por tubos de vidrio o plástico transparente. Estas instalaciones permiten mantener tanto la sanidad como el aislamiento de la especie cultivada. Su desventaja principal es ofrecer volúmenes de producción acotados, siendo a su vez instalaciones costosas con un alto mantenimiento.

Otro tipo de aplicaciones como la producción de ácidos grasos para biodiesel, biomasa con fines energéticos (combustión) o alimentos balanceados, realizan cultivos en fotobiorreactores abiertos tipo “raceway”. Esto se debe fundamentalmente a que tales aplicaciones no requieren la asepsia necesaria de los componentes farmacéuticos. Producir en este tipo de instalaciones fácilmente escalables y de menor inversión inicial, involucra grandes volúmenes de cultivo, reduciendo así los costos finales de producción frente a los fotobiorreactores tubulares. Las principales desventajas de este tipo de instalaciones es que al tiempo de ser más propensas a contaminantes patógenos externos (heces de pájaros, anfibios, etc.), no permiten controlar la pureza biológica de la especie cultivada ni regular algunos factores que son importantes para el crecimiento de las microalgas como por ejemplo la temperatura. Esto reduce la eficiencia de la instalación encareciendo el producto final lo cual, en algunos casos, hace que este tipo de cultivos no sea aun comercialmente competitivo.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia de las instalaciones de cultivo es aceptado que, más allá de las investigaciones que se realizan en cuanto al diseño y disposición de los fotobiorreactores, uno de los factores más influyente es el control de las variables de cultivo que afectan sensiblemente la producción. Cada especie de microalga presenta para una dada radiación puntos óptimos de crecimiento que dependen principalmente de la temperatura, el *pH* del cultivo y el oxígeno disuelto en el medio. Si bien la temperatura de un cultivo en volumen es una variable inviable de ser controlada, el *pH* y el oxígeno disuelto son factores que pueden regularse dosificando la inyección de burbujas de gases que contengan buenos porcentajes de CO_2 u O_2 respectivamente [1].

Otra importante reducción de costos de producción puede lograrse a través de la implementación de sensores virtuales (observadores) que, en base a mediciones de un

número reducido de variables, puedan estimar en forma suficientemente precisa, otras variables cuya medición implica disponer de dispositivos costosos o con un mantenimiento intensivo [2].

Así, la evaluación del comportamiento y eficiencia de nuevos controladores y observadores resulta imprescindible en el camino de lograr menores costos de producción. Con el fin de evitar largas y costosas tareas de experimentación durante la etapa de diseño, sintonización y pruebas de sus diseños, resulta importante contar con un simulador que represente adecuadamente la dinámica de crecimiento del proceso de cultivo.

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes al diseño y programación de un simulador de cultivos de microalgas en fotobiorreactores tipo “raceway”. La generación de esta herramienta permite reproducir con suficiente exactitud las excursiones de las principales variables del sistema ante perturbaciones externas (radiación solar y temperatura) y variaciones del caudal de los gases inyectados (control). Incorpora también la posibilidad de especificar la ubicación geográfica del fotobiorreactor y su orientación respecto del norte con el fin de contemplar el efecto de las sombras que las paredes del fotobiorreactor proyectan sobre el cultivo. Asimismo, presenta la posibilidad de especificar los días del año durante los cuales se pretende realizar la simulación y los parámetros característicos de la variedad de microalga cultivada.



a) Fotobiorreactor Tubular b) Fotobiorreactor tipo “Raceway”.

Figura 1: Tipos de instalaciones para el cultivo de microalgas.

ESTRUCTURA DE LOS FOTOBIORREACTORES TIPO “RACEWAY”

Estructuralmente los fotobiorreactores “raceway” están compuestos de tres partes principales. La que abarca mayor superficie es la pista, que es sencillamente un canal en operación sinfín por donde circula el cultivo impulsado por un conjunto de palas motorizadas. Estas palas impulsoras se ubican precediendo a la disposición de un foso donde se realiza la inyección de gases y la cosecha propiamente dicha. Las dimensiones del fotobiorreactor, la velocidad de circulación y altura del cultivo, así como el uso de deflectores en el foso y el tipo de gases a inyectar se determinan con el fin de reducir los costos de producción.

MODELO DINAMICO DE UN CULTIVO

Con el fin de poder simular el comportamiento de las principales variables de un cultivo de microalgas es necesario desarrollar un modelo dinámico que lo represente adecuadamente. En este sentido durante los últimos años diversas investigaciones han permitido obtener descripciones matemáticas que, una vez sintonizadas, logran reproducir con suficiente exactitud el comportamiento del sistema ante perturbaciones y variaciones de las entradas de control. En el caso de fotobiorreactores tipo “raceway” el modelo habitual se desarrolla en torno a las tres partes constitutivas del sistema: pista, palas y foso. Con el fin de reducir el orden del modelo de simulación, en este trabajo no se consideran las variaciones que se producen en las palas. Esta simplificación no afecta mayormente la exactitud del

modelo ya que las variaciones que se producen en ese sector del sistema no son significativas.

En líneas generales, las variaciones de las concentraciones de las principales variables que describen cada parte del sistema se originan en la radiación promedio que incide a lo largo de la profundidad de la porción del cultivo considerado. Esta radiación promedio puede expresarse como [1][3]:

$$I_{av} = \frac{I_o(t)}{h\ K_a\ C_b(t,x)}\left(1 - e^{-h\ K_a C_b(t,x)}\right) \quad (1)$$

donde I_o es la radiación instantánea que llega a la superficie, C_b la concentración de biomasa K_a es un parámetro constante y h es la altura del cultivo. La variable t simboliza al tiempo y x la posición en la pista de la parte del cultivo que se esté considerando.

Durante su crecimiento las microalgas producen oxígeno disuelto en el medio de cultivo. La velocidad especifica de generación de O_2 puede escribirse como:

$$PO_2(t,x) = \alpha_s \frac{\widehat{PO}_2\ I_{av}^n(t,x)}{K_i e^{mI_{av}(t,x)} + I_{av}^n(t,x)}\left(1 - \left(\frac{[O_2(t,x)]}{K_{O_2}}\right)^2\right)\left(B_1 e^{\frac{-C_1}{ph(t,x)}} - B_2 e^{\frac{-C_2}{ph(t,x)}}\right)\ f(T) - (1-\alpha_s)R_{O_2} \quad (2)$$

donde α_s es un factor que contempla el efecto de las sombras de las paredes del fotobiorreactor sobre el cultivo y depende de la ubicación geográfica, posición respecto al norte del fotobiorreactor, día del año y hora del día. $\widehat{PO}_2$, K_i, K_{O_2}, B_1, B_2, C_1, C_2, y R_{O_2} son constantes del modelo que identifican las particularidades de cada cepa de microalga y m, n y z son parámetros de forma. Puede observarse en (2) que la producción de oxígeno está determinada por un factor principal dependiente de la radiación promedio y factores moduladores que atenúan esa producción y dependen de la concentración de oxígeno disuelto ($[O_2]$), el *pH* y temperatura del cultivo ($f(T)$). El último término de (2) corresponde a la respiración del cultivo que toma preponderancia en horas nocturnas.

A partir de (2) es directo interpretar que para maximizar la producción de biomasa es necesario controlar el punto de operación del sistema de manera que los factores antedichos se sitúen en sus valores pico. Dado que la temperatura en reactores abiertos es una variable impuesta por el clima e inviable de ser regulada, maximizar la producción implica poder controlar la concentración del oxígeno disuelto y el *pH* del cultivo. Este proceso se realiza en el foso a partir de la inyección de burbujas de diferentes gases (aire o gas de combustión).

Modelo de la Pista: el modelo dinámico de la pista de sección transversal efectiva wh, se desarrolla considerando un flujo tipo pistón moviéndose a velocidad v en el cual los efectos de difusión no son significativos. Dado que es un sistema distribuido su representación involucra el empleo de derivadas parciales espaciales y temporales en las variables empleadas para la descripción del proceso: oxígeno disuelto (O_2), carbón total (C_T), dióxido de carbono disuelto (CO_2) y *pH* [1][3].

$$\frac{\partial C_b(t,x)}{\partial t} = -v\ \frac{\partial C_b(t,x)}{\partial x} + PO_2(t,x)C_b(t,x)Y_{b/O_2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial [O_2]\ (t,x)}{\partial t} = -v\ \frac{\partial [O_2](t,x)}{\partial x} + \frac{PO_2(t,x)C_b(t,x)}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2}p}\left([O_2^*](t,x) - [O_2](t,x)\right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial [C_T]\ (t,x)}{\partial t} = -v\ \frac{\partial [C_T](t,x)}{\partial x} + \frac{PCO_2(t,x)C_b(t,x)}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2}p}\left([CO_2^*](t,x) - [CO_2](t,x)\right) \quad (5)$$

$$[\dot{CO}_2] = \left[\dot{C}_T\right]/(P_2 - P_1P_3[CO_2]) \quad (6)$$

$$[\dot{H}^+] = P_3[\dot{CO}_2] \quad (7)$$

donde Y_{b/O_2} es el rendimiento oxigeno generado a biomasa, M_{O_2} y M_{CO_2} son los pesos moleculares del oxígeno y del dióxido de carbono, $K_{la_{O_2 p}}$ y $K_{la_{CO_2 p}}$ son los coeficientes de transferencia de la pista, $[O_2^*]$ y $[CO_2^*]$ son los valores de equilibrio de oxígeno y dióxido de carbono disuelto determinados por la ley de Henry y $pH = -log([H^+])$. Debe notarse que $PCO_2(t,x) = -PO_2(t,x)$ y que (6) y (7) surgen del planteamiento de la dinámica del buffer de carbono donde $P_1 = \frac{K_1}{[H^+]^2} + \frac{2K_1K_2}{[H^+]^3}$, $P_2 = 1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1K_2}{[H^+]^2}$ y

$P_3 = \left(\frac{K_1}{[H^+]} + \frac{2K_1K_2}{[H^+]^2}\right) / \left(1 + \frac{K_w}{[H^+]^2} + \frac{K_1[CO_2]}{[H^+]^2} + 4\frac{K_1K_2[CO_2]}{[H^+]^3}\right)$, con $K_1 = 10^{-6{,}381}$, $K_2 = 10^{-10{,}377}$ y $K_w = 10^{-14}$.

Es interesante resaltar que el primer término de (3) (4) y (5) corresponde al efecto de desplazamiento del perfil longitudinal de concentración respectivo dentro del volumen diferencial considerado, el segundo término da cuenta del aumento de la concentración respectiva por fotosíntesis y el tercer término corresponde a la transferencia de gases disueltos entre las fases líquida y gaseosa.

Modelo del Foso: el modelo dinámico del foso considera que la mezcla en su interior es homogénea. Básicamente distingue dos fases, la líquida y la gaseosa ya que es en este lugar donde se realiza la inyección de gases como acción de control. La fase líquida puede describirse a partir de las siguientes ecuaciones en derivadas totales [1][3]:

$$\dot{C}_{b\,f} = -\frac{Q_{liq}}{V_{fc}}(C_{b\,f} - C_{b\,in}) + PO_{2\,f}\, C_{b\,f}\, Y_{b/O_2} - \frac{Q_m}{V_s(1-\varepsilon_f)} C_{b\,f} \quad (8)$$

$$[\dot{O}_2]_f = \frac{-Q_{liq}}{V_{fc}}([O_2]_f - [O_2]_{in}) + \frac{PO_{2\,f}\, C_{b\,f}}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2 f}}([O_2^*]_g - [O_2]_f)_{lm} + \frac{Q_m}{V_{fc}}([O_2]_m - [O_2]_f) \quad (9)$$

$$[\dot{C}_T]_f = \frac{-Q_{liq}}{V_{fc}}([C_T]_f - [C_T]_{in}) + \frac{PCO_{2\,f}\, C_{b\,f}}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2 f}}([CO_2^*]_g - [CO_2]_f)_{lm} + \frac{Q_m}{V_{fc}}([C_T]_m - [C_T]_f) \quad (10)$$

donde $Q_{liq} = whv$, Q_m y Q_g son respectivamente los caudales del cultivo circulante, cosechado y gas inyectado; $V_{fc} = V_f(1-\varepsilon)$ es el volumen del foso corregido por la inyección de gases con $\epsilon = Q_g/(Q_{liq} + Q_g)$; $C_{b\,in}$, $[O_2]_{in}$ y $[C_T]_{in}$ corresponden a las concentraciones de biomasa, oxígeno disuelto y carbón total que ingresan desde la pista al foso; $[O_2]_m$ y $[C_T]_m$ son las concentraciones correspondientes al medio de reemplazo de la cosecha, $K_{la_{O_2 f}}$ y $K_{la_{CO_2 f}}$ son las constantes de transferencia del foso y $[O_2^*]_g$ y $[CO_2^*]_g$ son los valores de equilibrio de oxígeno y dióxido de carbono disuelto determinados por el gas inyectado. El subíndice *lm* indica que el factor debe interpretarse como una media logarítmica. Las relaciones entre $[C_T]_f$ $[CO_2]_f$ y el *pH* del foso siguen los lineamientos planteados en (6) y (7).

La descripción matemática de la fase gaseosa se realiza a partir de las fracciones molares del O_2 y CO_2 respecto al N_2 del gas inyectado ya que este elemento es insoluble en el cultivo. Las ecuaciones correspondientes a esta fase pueden escribirse como [1][3]:

$$\frac{dYO_{2_{out}}}{dt} = -\frac{Q_g}{V_{fc}}(YO_{2_{out}} - YO_{2_{in}}) + K_{la_{O_2 f}} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} ([O_2^*]_g - [O_2])_{lm} \quad (11)$$

$$\frac{dYCO_{2_{out}}}{dt} = -\frac{Q_g}{V_{fc}}(YCO_{2_{out}} - YCO_{2_{in}}) + K_{la_{CO_2 f}} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} ([CO_2^*]_g - [CO_2])_{lm} \quad (12)$$

Estas expresiones dan cuenta de las variaciones de las fracciones molares en la interfaz de salida de los gases $YO_{2_{out}}$ e $YCO_{2_{out}}$. En ellas V_{mol} es el volumen molar e y_{N_2} es la fracción molar de nitrógeno del gas inyectado. Debe notarse que cuando no hay inyección estas fracciones molares pierden sentido y por lo tanto se consideran nulas.

ESPECIFICACIONES DEL SIMULADOR

Para poder calcular las variaciones temporales de las variables que representan la dinámica del "raceway", el simulador debe integrar numéricamente y en forma simultánea la serie de ecuaciones diferenciales (3)-(12).

Debido a que la circulación del cultivo se considera del tipo pistón (se desprecian los efectos de difusión), una forma de evitar la aparición de derivadas parciales temporales en la resolución de las ecuaciones (3)-(5), consiste en dividir la pista en un número adecuado de celdas (*N*), de forma de evitar el movimiento relativo entre el perfil de concentración y el volumen de cada celda. Para lograr este efecto el número de celdas y su longitud debe estar en concordancia con la velocidad de traslación del cultivo y el tiempo de muestreo empleado para el cálculo. Usando esta metodología cada una de las *N* celdas quedará representada por el conjunto de ecuaciones:

$$\dot{C}_b = PO_2(t,x)C_b(t,x)Y_{b/O_2} \tag{13}$$

$$[\dot{O}_2] = \frac{PO_2(t,x)C_b(t,x)}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2\,p}}([O_2^*] - [O_2]) \tag{14}$$

$$[\dot{C}_T] = \frac{PCO_2(t,x)C_b(t,x)}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2\,p}}([CO_2^*] - [CO_2]) \tag{15}$$

$$[\dot{CO}_2] = [\dot{C}_T]/(P_2 - P_1P_3[CO_2]) \tag{16}$$

$$[\dot{H}^+] = P_3[\dot{CO}_2] \tag{17}$$

Cada una de las celdas recorre la longitud total de la pista antes de caer al foso sin que exista interacción entre las variables de cada una de ellas. La interacción solo se produce con el medio externo a través de la radiación solar, la temperatura y las transferencias entre los gases disueltos en el cultivo y la atmosfera circundante. Así, luego de cada paso de cálculo, el contenido de la celda *N-esima* se diluye en contenido del foso mientras que la primera celda pasa a tomar los valores correspondientes al foso calculados durante el último paso.

La dinámica del foso afecta solamente los valores de la primer celda que, en cada paso de cálculo, se carga íntegramente con las concentraciones del cultivo que se encuentra en él. La resolución de la dinámica del foso es mas sencilla que la de la pista porque solo involucra derivadas totales, sin embargo, deben integrarse en forma simultánea las ecuaciones diferenciales de la fase liquida y gaseosa. Esta última fase tiene efecto sobre la primera a través de los valores de equilibrio de los gases disueltos en la interfaz superior del foso los cuales dependen de $yO_{2_{out}}$ e $yCO_{2_{out}}$ Como puede observarse estas variables forman parte del cálculo de las medias logarítmicas que aparecen en (9), (10), (11) y (12).

RESULTADOS DE SIMULACION

En la figura 3 se presentan los resultados de una simulación en un "raceway" situado en la ciudad de La Plata con un ángulo respecto al norte de +15º. En ella se empleó el perfil de radiación PAR de la Figura 2a sin control de lazo cerrado y con un controlador del tipo ON/OFF asociado a un ciclo de histéresis de amplitud 0,025 (simétrico), que trata de mantener el *pH* del foso en un valor de referencia de 8. En la Figura 2b se presenta el perfil temporal correspondiente al coeficiente α_s. Las variaciones observadas en los gráficos siguientes se

corresponden cualitativamente con datos experimentales consignados en artículos publicados [1][3]. Una validación y sintonía superadora podría lograrse disponiendo del hardware necesario para realizar los experimentos correspondientes.

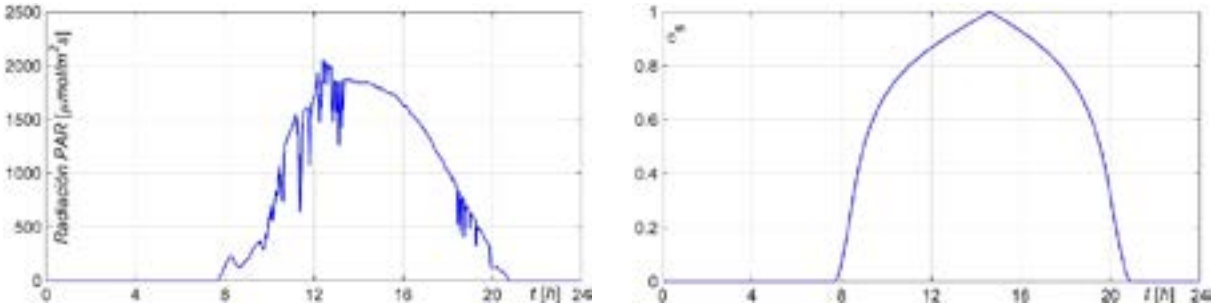


Figura 2: a) Perfil de radiación incidente b) Coeficiente α_s

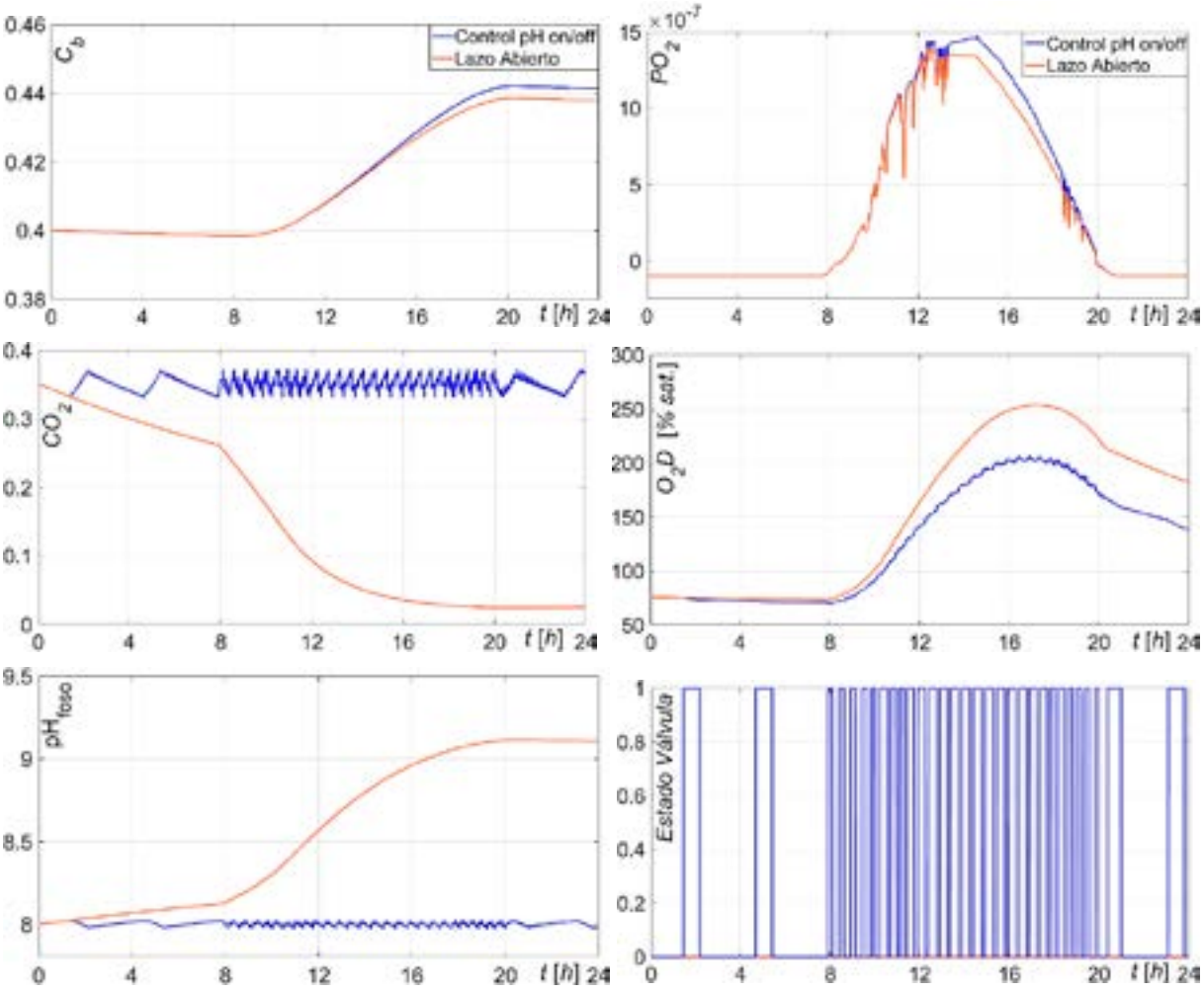


Figura 3: Resultados del simulador a lazo abierto (naranja) y con control on/off (azul)

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un simulador de cultivos de microalgas en fotobiorreactores tipo “raceway” desarrollado en el entorno MATLAB-SIMULINK©. Una vez sintonizada a la variedad de microalga elegida, esta herramienta permite validar la eficacia de los diseños realizados con el fin de controlar alguna variable seleccionada (*pH*, O_2, etc.) o bien evaluar diseños de observadores en configuraciones de lazo abierto o lazo cerrado. La principal ventaja de este simulador es su flexibilidad ya que le permite al usuario seleccionar un mayor número parámetros y contextos de simulación, como así también incorporar en línea cualquier tipo de diseño de controlador sin restricciones. Las principales ventajas de este simulador son las siguientes: *i)* permite usar perfiles de radiación y temperatura externos; *ii)* incorpora los efectos de sombra correspondientes a la posición geográfica y día del año simulado *iii)* permite incorporar diseños de controladores y referencias sin restricción; *vi)* permite fijar los parámetros de la microalga cultivada.

REFERENCIAS

[1] “First principles model of a tubular photobioreactor for microalgal production”, Fernandez I., Acien F. G., Berenguel M. and Guzman L. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, DOI: 10.1021/ie501438r.

[2] “Soft-sensor based on sliding modes for industrial raceway photobioreactor”, Delgado E., Moreno J., Rodriguez-Miranda E., Baños A., Barreiro A., Guzman L. *Biosystems Engineering*, DOI:10.1016/j.biosystemseng.2024.07.015.

[3] “Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production” Fernandez I., Acién F.G., Guzman L. Berenguel M. Mendoza J.L. *Algal Research*, DOI: 10.1016/j.algal.2016.04.021.

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR HORARIA BAJO CONDICIONES CAMBIANTES DEL CIELO MEDIANTE GRADIENT BOOSTING

Cappelletti Marcelo A.[1,2], Olivera Lucas M.[2,3], Inthamoussou Fernando A.[1]

1 Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata 1900, Argentina
2 Programa TICAPPS, Universidad Nacional Arturo Jauretche, Av. Calchaqui N 6200, Florencio Varela 1888, Provincia de Buenos Aires, Argentina
3 Becario de la Comisión de Investigaciones Científicas, (CICPBA), La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina
E-mail: marcelo.cappelletti@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El crecimiento constante de la demanda mundial de energía, junto con el agotamiento progresivo de las reservas de combustibles fósiles y los impactos ambientales negativos derivados de su combustión, ha impulsado la búsqueda y el desarrollo de fuentes de energía alternativas. En este contexto, la energía solar emerge como una opción clave, destacándose por su carácter limpio, renovable, de bajo impacto ambiental, su disponibilidad local y su sostenibilidad a largo plazo. Esta transición hacia fuentes solares contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y a la protección del medio ambiente [1].

La radiación solar es el factor ambiental más relevante en las aplicaciones de energía solar, y desempeña un papel fundamental en áreas como la meteorología, los estudios climáticos, la arquitectura, la agricultura y la gestión de sistemas energéticos. Además, la radiación solar es esencial en el diseño y dimensionamiento de los sistemas de energía solar, incluyendo tanto los sistemas fotovoltaicos (SFV) como los térmicos, ya que su adecuada estimación es clave para optimizar el rendimiento de estas tecnologías [2, 3]. Pequeñas fluctuaciones en la radiación solar causadas por la cobertura de nubes pueden afectar profundamente la estabilidad y el rendimiento del suministro de energía de los SFV [4].

Por lo tanto, contar con un conocimiento preciso de la radiación solar en momentos y ubicaciones específicas es esencial para optimizar el aprovechamiento de la energía solar. No obstante, en muchos países, especialmente en las regiones en desarrollo, el elevado costo de los piranómetros ha dificultado considerablemente la medición precisa de la radiación solar, lo que limita su aplicación práctica en sistemas solares de pequeña escala [5].

Por este motivo, suelen utilizarse modelos teóricos para la estimación de la radiación solar, entre ellos, la ecuación de Ångström–Prescott y sus modificaciones, modelos lineales, polinómicos, exponenciales y logarítmicos, técnicas geoestadísticas, técnicas estocásticas y técnicas basadas en imágenes satelitales [6-8].

Este campo de estudio permanece abierto a propuestas innovadoras que brinden resultados precisos con un bajo costo computacional, facilidad de implementación y buena velocidad de convergencia. En consecuencia, las técnicas de aprendizaje automático (ML: *Machine Learning*) han surgido recientemente como alternativas poderosas, que ofrecen resultados superiores en la predicción de la radiación solar en comparación con los métodos convencionales [9-12].

Ante este contexto, este trabajo presenta un nuevo enfoque para la estimación precisa de la radiación solar horaria en condiciones cambiantes de cielo, utilizando Gradient Boosting (GB). El modelo propuesto se basa en solo cinco variables de entrada fácilmente medibles: la hora del día, el mes, la temperatura del aire, la humedad relativa y la presión atmosférica, lo que lo hace simple y rentable de implementar a gran escala en áreas sin acceso a costosos dispositivos de medición de la radiación solar, como los piranómetros.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la estimación de la radiación solar horaria en condiciones de cielo variable, se utilizó el algoritmo de aprendizaje automático supervisado Gradient Boosting (GB) y el índice de claridad. El algoritmo GB funciona como una técnica de aprendizaje colectivo que combina una secuencia de modelos débiles para construir uno robusto. Los modelos débiles se entrenan y se combinan iterativamente para mejorar la precisión de la predicción. Este proceso iterativo implica la introducción de nuevos modelos para refinar la precisión de sus predecesores [13].

La estructura ilustrada en la Figura 1 representa la secuencia típica de árboles de decisión utilizados en un algoritmo GB. La precisión del modelo GB se basa predominantemente en hiperparámetros específicos, como la cantidad de árboles, la tasa de aprendizaje, la profundidad máxima a la que pueden crecer los árboles, las muestras mínimas por hoja y la cantidad máxima de nodos de hojas. Ajustar estos hiperparámetros es crucial para determinar la arquitectura óptima del modelo GB. La optimización de los hiperparámetros de los modelos se logró utilizando el método de Optimización Bayesiana (BO) [14]. Este método utiliza modelos bayesianos basados en procesos gaussianos para predecir los parámetros de ajuste óptimos. Además, la capacidad de generalización de los modelos se evaluó a través de una técnica de validación cruzada de 5 pasos. Los modelos propuestos se implementaron dentro del entorno Python.

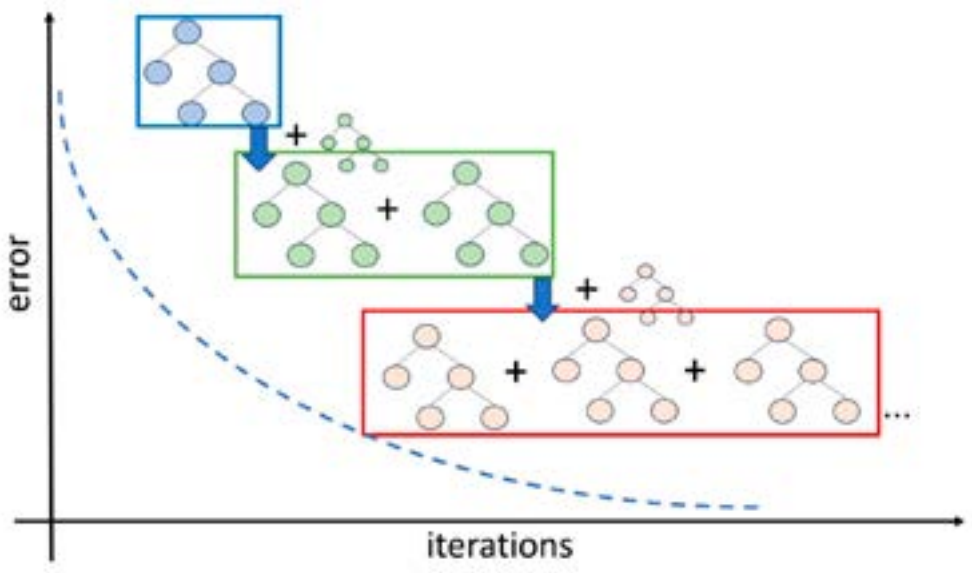


Fig. 1. Estructura de un algoritmo de Gradient Boosting.

Figure 1: Structure of a gradient boostin algorithm.

Por otro lado, el índice de claridad Kt se define como la relación entre la radiación solar global sobre la superficie horizontal y la radiación solar extraterrestre en las mismas coordenadas geográficas y durante un período de tiempo [15]. Este índice se utiliza ampliamente para caracterizar las condiciones del cielo en una localidad en particular. Los índices de claridad altos indican condiciones de cielo despejado, mientras que los índices de claridad bajos implican condiciones de cielo parcialmente o totalmente nublado. En este trabajo, la radiación solar extraterrestre horaria se calculó utilizando ecuaciones estándar [16]. En la literatura se han propuesto diferentes rangos de valores de Kt. En este trabajo hemos adoptado la siguiente clasificación, de acuerdo a lo sugerido por Okogbue et al. (2009) y Yousif et al. (2013) [17, 18]:

- Kt > 0,6: condición de cielo despejado o soleado
- 0,4 ≤ Kt ≤ 0,6: condición de cielo parcialmente nublado
- Kt < 0,4: condición de cielo nublado

Para entrenar y evaluar los modelos, el conjunto de datos de entrada incluye información horaria (hora del día y número de mes del año) y parámetros meteorológicos, como la temperatura del aire, la humedad relativa y la presión atmosférica. El conjunto de datos utilizado para el entrenamiento y la evaluación consta de 40156 muestras. Todos los datos fueron obtenidos de una estación meteorológica automatizada Davis Vantage Pro2, ubicada en Florencio Varela, Buenos Aires, Argentina. El período cubierto por el conjunto de datos va desde diciembre de 2017 hasta marzo de 2023, con intervalos de 30 minutos. Se seleccionaron los datos registrados entre las 8:00 y las 18:00 horas, dado que la irradiancia solar es mínima durante la noche y las primeras horas de la mañana. El 80% de los datos se asignó a la fase de entrenamiento, mientras que el 20% restante se reservó para evaluar los modelos con datos reales nuevos, que no fueron utilizados previamente.

Teniendo en cuenta el índice de claridad Kt, todo el conjunto de datos se divide en 16284 muestras para Kt mayor que 0,6, 10003 muestras para Kt mayor o igual a 0,4 y menor o igual a 0,6, y 13869 muestras para los casos restantes.

Previo al entrenamiento de los modelos, se realizó un preprocesamiento riguroso de los datos para garantizar la calidad y la coherencia de los mismos. Este preprocesamiento incluyó procedimientos de control de calidad estándar, como la detección y eliminación de valores atípicos, así como comprobaciones de validación para identificar y descartar cualquier dato inconsistente o erróneo.

Al incorporar el índice de claridad, los modelos pueden adaptarse a las condiciones cambiantes del cielo, mejorando aún más su precisión y robustez. Esto es particularmente importante, ya que la intermitencia de la radiación solar, especialmente en cielos nublados o parcialmente nublados, presenta un desafío significativo para la producción confiable de energía solar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se propusieron tres modelos diferentes (M1 a M3) para estimar la radiación solar en diferentes condiciones del cielo utilizando el algoritmo GB. La Tabla 1 muestra las variables consideradas para cada modelo, donde Mes, Hora, Temp., Hum. y Presión representan el número de mes del año, la hora del día, la temperatura del aire, la humedad relativa y la presión atmosférica, respectivamente. Como se muestra en la tabla, M1 utiliza el conjunto de datos total, mientras que M2 utiliza solo datos con Kt > 0,6, y M3 utiliza datos con 0,4 ≤ Kt ≤ 0,6, correspondientes a condiciones de cielo soleado y parcialmente nublado, respectivamente.

Tabla 1. Modelos propuestos para la estimación de la radiación solar horaria bajo diferentes condiciones de cielo.

Datos/Modelos	M1	M2	M3
Datos totales	X		
Cielo soleado (Kt > 0,6)		X	
Cielo parcialmente nublado (0,4 ≤ Kt ≤ 0,6)			X
Mes, Hora, Temp., Hum. y Presión	X	X	X

La Figura 2, en la columna de la izquierda, muestra diagramas de dispersión que comparan los valores de radiación solar observados y estimados para modelos con diferentes entradas (M1 a M3). Es evidente que los modelos M2 y M3, que utilizan el índice de claridad (Kt), logran resultados superiores en comparación con el modelo M1, que utiliza todo el conjunto de datos. Por su parte, en la columna de la derecha de la Figura 2, se muestra el seguimiento de la convergencia del error cuadrático medio (RMSE) en los conjuntos de datos de entrenamiento y validación durante todo el proceso de entrenamiento para los modelos M1 a M3. Un análisis minucioso de estos gráficos no revela signos de sobreajuste; esto se evidencia por las tendencias estables y consistentes de RMSE en ambos conjuntos de datos a lo largo de las fases de entrenamiento y validación.

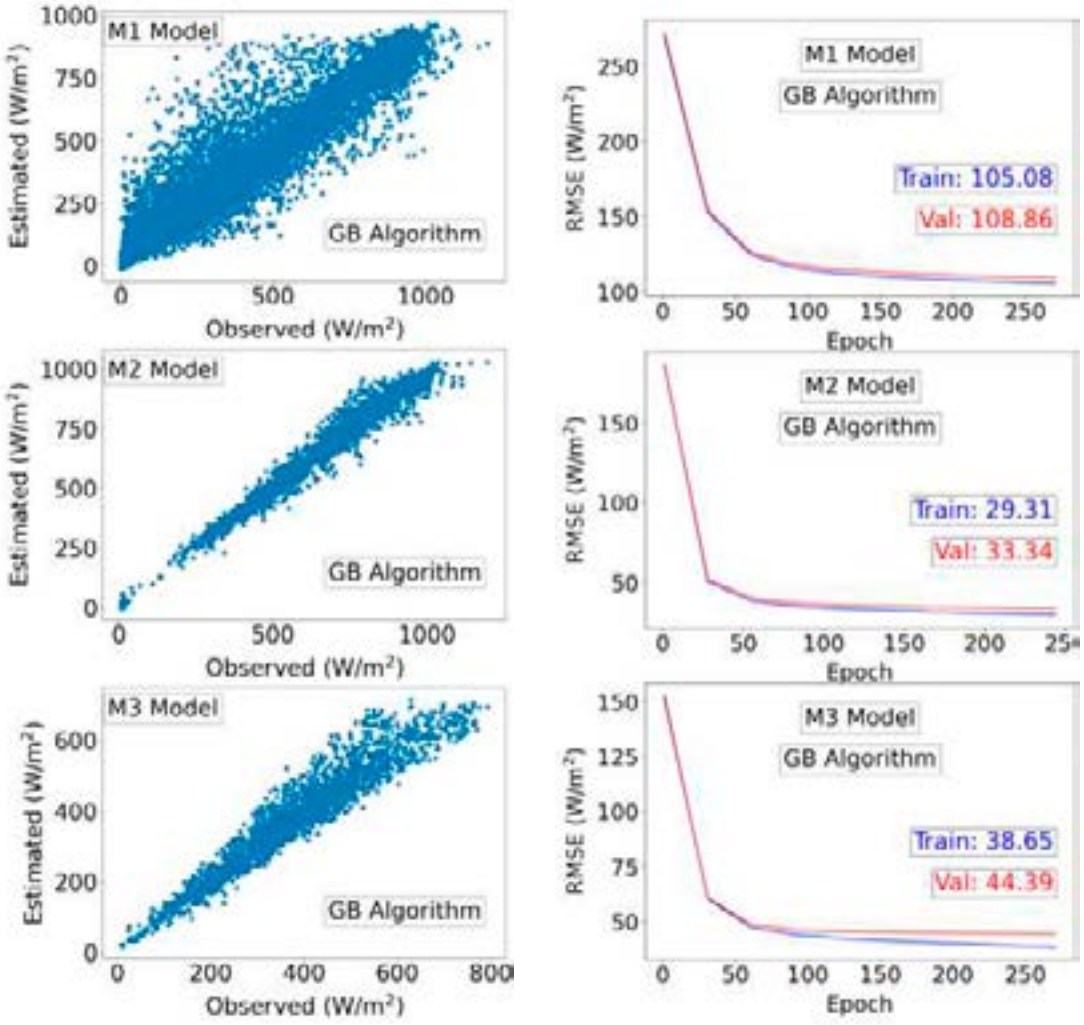


Fig. 2. Columna de la izquierda: Diagramas de dispersión que comparan la radiación solar observada y estimada para los modelos M1 a M3. Columna de la derecha: Gráficos de métricas RMSE para conjuntos de datos de entrenamiento y validación en distintas épocas.

La Tabla 2 presenta una evaluación cuantitativa utilizando las métricas R^2, RMSE, MAE y MAPE para los conjuntos de entrenamiento y validación. Estas métricas confirman las observaciones realizadas a partir de los diagramas de dispersión, demostrando que los modelos M2 y M3 superan a M1. En particular, los valores RMSE exhiben reducciones significativas de 108,86 W/m^2 a 33,34 W/m^2 para condiciones de cielo soleado, y a 44,39 W/m^2

para condiciones de cielo parcialmente nublado. Cabe destacar que el modelo diseñado para condiciones de cielo soleado (M2) demuestra un desempeño superior en comparación con el modelo para condiciones de cielo parcialmente nublado (M3), lo que se atribuye a la mayor variabilidad de la radiación solar global durante condiciones parcialmente nubladas.

Tabla 2. Comparación de las métricas de rendimiento de los modelos M1 a M3 aplicado a los conjuntos de entrenamiento y validación.

Métrica	M1		M2		M3	
	Entrenam.	Valid.	Entrenam.	Valid.	Entrenam.	Valid.
R^2	0,86	0,85	0,98	0,97	0,94	0,92
RMSE (W/m^2)	105,08	108,86	29,31	33,34	38,65	44,39
MAE (W/m^2)	73,81	76,34	20,41	23,03	29,58	33,73
MAPE (%)	55,50	58,59	3,68	4,26	9,16	9,89

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un enfoque novedoso y prometedor para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de energía solar en diversos contextos ambientales. Se desarrollaron modelos para la estimación precisa de la radiación solar horaria en condiciones de cielo variable utilizando Gradient Boosting, a partir de datos meteorológicos recopilados por una estación automatizada ubicada en Florencio Varela, Argentina. Los modelos fueron optimizados incorporando un índice de claridad, lo que aumentó su adaptabilidad. Los modelos propuestos fueron rigurosamente evaluados con datos nuevos, no utilizados durante la fase de entrenamiento, lo que demuestra tanto su robustez como su aplicabilidad práctica. Las principales contribuciones de este trabajo son: una alta precisión en la estimación de la radiación solar a corto plazo; a diferencia de enfoques previos, el modelo solo requiere variables económicas como mes, hora del día, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica; se alcanzó una alta precisión, con valores R^2 de 0,97 y 0,92, y bajas tasas de error, con valores de RMSE de 33,34 W/m² y 44,39 W/m², en condiciones de cielo soleado y parcialmente nublado, respectivamente; la simplicidad, adaptabilidad y facilidad de reentrenamiento en línea del modelo de Gradient Boosting ofrecen una solución prometedora para aplicaciones solares a pequeña escala, gestión energética y evaluaciones regionales de recursos solares tanto en regiones desarrolladas como en desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] International Energy Agency. Renewables 2021 - analysis and forecasts 580 to 2026, 2021.
[2] Julian D. Osorio, Stiven Zea, Alejandro Rivera-Alvarez, Gustavo A. Patino-Jaramillo, Rob Hovsapian, and Juan C. Ordonez. Low temperature solar thermal-power systems for residential electricity supply under various seasonal and climate conditions. Applied Thermal Engineering, 232:120905, 2023.
[3] Keyong Hu, Lidong Wang, Wenjuan Li, Shihua Cao, and Yuyan Shen. Forecasting of solar radiation in photovoltaic power station based on ground-based cloud images and bp neural network. IET Generation, Transmission & Distribution, 16(2):333‐350, 2022.
[4] Florian Barbieri, Sumedha Rajakaruna, and Arindam Ghosh. Very short term photovoltaic power forecasting with cloud modeling: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75:242–263, 2017.
[5] C. Pandey, K. Katiyar. Solar Radiation: Models and Measurement Techniques. Journal of Energy, 2013: 305207, 8 pages, 2013.
[6] B.G. Akinoglu and A. Ecevit. A further comparison and discussion of sunshine-based models to estimate global solar radiation. Energy, 15(10):865‐872, 1990.

[7] S. Kaplanis and E. Kaplani. A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation i(h;nj) values. Renewable Energy, 628 32(8):1414‐1425, 2007.
[8] Pranda M. P. Garniwa, Raden A. A. Ramadhan, and Hyun-Jin Lee. Application of semi-empirical models based on satellite images for estimating solar irradiance in Korea. Applied Sciences, 11(8), 2021.
[9] Raden A.A. Ramadhan, Yosca R.J. Heatubun, Sek F. Tan, and Hyun-Jin Lee. Comparison of physical and machine learning models for estimating solar irradiance and photovoltaic power. Renewable Energy, 178:1006‐1019, 2021.
[10] Mustapha Mukhtar, Ariyo Oluwasanmi, Nasser Yimen, Zhang Qinxiu, Chiagoziem C. Ukwuoma, Benjamin Ezurike, and Olusola Bamisile. Development and comparison of two novel hybrid neural network models for hourly solar radiation prediction. Applied Sciences, 12(3), 2022.
[11] Zhihong Pang, Fuxin Niu, and Zheng O’ Neill. Solar radiation prediction using recurrent neural network and artificial neural network: A case study with comparisons. Renewable Energy, 156:279‐289, 2020.
[12] Pratima Kumari and Durga Toshniwal. Extreme gradient boosting and deep neural network based ensemble learning approach to forecast hourly solar irradiance. Journal of Cleaner Production, 279:123285, 2021.
[13] Muhammed A. Hassan, A. Khalil, S. Kaseb, andM.A. Kassem. Exploring the potential of tree-based ensemble methods in solar radiation modeling. Applied Energy, 203:897‐916, 2017.
[14] Hakki Mert Torun, Madhavan Swaminathan, Anto Kavungal Davis, and Mohamed Lamine Faycal Bellaredj. A global bayesian optimization algorithm and its application to integrated system design. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 26(4):792‐802, 2018.
[15] K.G.T. Hollands and R.G. Huget. A probability density function for the clearness index, with applications. Solar Energy, 30(3):195–209, 1983.
[16] M. Jamil Ahmad and G. N. Tiwari. Evaluation and comparison of hourly solar radiation models. International Journal of Energy Research, 33(5):538–552, 2009.
[17] E. C. Okogbue, J. A. Adedokun, and B. Holmgren. Hourly and daily clearness index and diffuse fraction at a tropical station, ile-ife, Nigeria. International Journal of Climatology, 29(8):1035‐1047, 2009.
[18] Charles Yousif, Gorka Ona Quecedo, and Julia Bilbao Santos. Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. Renewable Energy, 49:203‐206, 2013. Selected papers from World Renewable Energy Congress - XI.

ENFOQUES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES PARA EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA LIBRES DE PLOMO

Saltos Sánchez Harry[1,2,3], Pinzón Carlos[4], Alvira Fernando[4],
Gil Rebaza Arles[5,6], Cappelletti Marcelo[1,7]

1 Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata 1900, Argentina
2 Becario de la CICPBA, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina
3 Fac. Ingeniería y Ciencias Agrarias, Univ. Católica Argentina (UCA), CABA, Argentina
4 Laboratorio SiCoBioNa, Univ. Nac. de Quilmes, Argentina
5 Dpto. de Física, Fac. de Ciencias Exactas, Univ. Nac. de La Plata, La Plata, Argentina
6 Instituto de Física La Plata (IFLP), CCT La Plata - CONICET, La Plata, Argentina
7 Programa TICAPPS, Univ. Nac. Arturo Jauretche, Florencio Varela, Argentina
E-mail: saltossanchezh@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El considerable potencial de la energía solar se presenta como una fuente renovable y limpia de electricidad, con un bajo impacto ambiental, disponibilidad en el lugar de consumo y sostenibilidad, lo que la hace una alternativa para reemplazar fuentes de energía no renovables como el carbón, petróleo y gas natural, además de contribuir a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) a la atmósfera, con el fin de preservar el medio ambiente. En consecuencia, en los últimos años ha surgido un notable interés en la investigación de celdas solares basadas en diversos materiales y tecnologías de fabricación. Las celdas solares son dispositivos fotovoltaicos que transforman la radiación solar en energía eléctrica, con bajos costos operativos y niveles mínimos de contaminación [1].

Uno de los desarrollos que ha cobrado especial relevancia en los últimos años son las celdas solares de perovskita (CSP), una tecnología que promete revolucionar la industria fotovoltaica. Las CSP tienen excelentes propiedades optoelectrónicas debido a su ancho de banda ajustable, gran movilidad de portadores, alto coeficiente de absorción y largas longitudes de difusión, lo que las convierte en excelentes candidatas para aplicaciones fotovoltaicas [2, 3]. Además, estos dispositivos tienen un proceso de fabricación más simple y un costo menor en comparación con las celdas solares convencionales basadas en silicio.

Las CSP consisten en un material de perovskita como absorbente de luz, intercalado entre una capa de transporte de huecos (HTL) y una capa de transporte de electrones (ETL). Recientemente, eficiencias superiores al 25% se han logrado para las CSP orgánicas-inorgánicas basadas en $MAPbI_3$ y $FAPbI_3$ como materiales de captación de luz [4].

En los últimos años, los compuestos de perovskita totalmente inorgánicos como $CsPbX_3$ (X = I, Br, Cl) y los nuevos materiales basados en perovskita con bajas concentraciones de Pb o libres de Pb, como $CsGe_nPb_{1-n}X_3$ y $CsSn_nPb_{1-n}X_3$ (X = I, Br, Cl; $0 \leq n \leq 1$), han atraído la atención de los investigadores por su potencial para mejorar la estabilidad a largo plazo de los dispositivos y reducir su toxicidad [5-7].

En este trabajo, hemos estudiado CSP totalmente inorgánicas basadas en diferentes materiales absorbentes como capa de perovskita. Específicamente, hemos investigado y discutido las propiedades opto-electrónicas de los materiales de perovskita $CsBX_3$ (B = Pb, Sn, Ge y X = I, Br, Cl), como el parámetro de red, la energía de formación y la banda prohibida electrónica (*band-gap*). Además, hemos llevado a cabo simulaciones numéricas para estudiar el rendimiento de diferentes arquitecturas de CSPs. Finalmente, se discuten los resultados de la fabricación y caracterización de uno de los materiales estudiados como ETL (ZnO). Los resultados obtenidos contribuyen a mejorar el rendimiento de las CSPs y buscar una alternativa “más ecológica” utilizando menos Pb en ellas.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la determinación de las propiedades opto-electrónicas en su estructura cristalina más estable de materiales candidatos a ser utilizados en CSP, se utilizaron cálculos mecánico-cuánticos de primeros principios basados en la Teoría de la Funcional Densidad (DFT). Específicamente, el estudio de las propiedades electrónicas, magnéticas y la determinación de los anchos de banda prohibida (band-gaps) tanto electrónico como óptico, se realizó usando el método de onda plana aumentada linealizada de potencial total (FP-LAPW: *Full-Potential Augmented Plane-Wave*) en código VASP [8].

Asimismo, se utilizaron herramientas computacionales que posibilitan la descripción de dispositivos fotovoltaicos por medio de ecuaciones que representan su comportamiento, ofreciendo un conocimiento detallado y preciso para predecir y mejorar la respuesta de los dispositivos, a un costo muy inferior y en menor tiempo que la experimentación. En particular, el estudio y análisis de CSP totalmente inorgánicas considerando diferentes materiales para cada capa, se llevó a cabo a través del software SCAPS-1D [9]. Este software resuelve numéricamente las ecuaciones básicas de los semiconductores: Poisson y continuidad de portadores, de manera de poder obtener la respuesta del dispositivo bajo diferentes condiciones de diseño y de funcionamiento. Al respecto, se analizó la respuesta de los dispositivos, a través de la modelización y simulación numérica, utilizando diferentes espesores, densidades de dopado, longitudes de difusión, etc..

Las propiedades opto-electrónicas obtenidas mediante DFT fueron utilizadas como datos de entrada en el software SCAPS-1D. Estas propiedades son sumamente importantes dado que pueden afectar la eficiencia y estabilidad de los dispositivos. En general, en los códigos de simulación de dispositivos, se colocan valores estándar para estos parámetros. El hecho de poder conocer de una manera más precisa sus valores permite reproducir a los dispositivos de una forma más cercana a su funcionamiento real.

Finalmente, en línea con la futura fabricación de CSP, se llevó a cabo la fabricación de nanocapas de ZnO sobre un sustrato de vidrio mediante el método de Spray Pyrolysis, mientras que para su caracterización, se emplearon las técnicas de difracción por Rayos X (DRF), microscopía electrónica (SEM) y espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección se divide en tres etapas: el estudio de propiedades opto-electrónicas de materiales candidatos a ser utilizados en las CSP; el estudio de las CSP considerando diferentes materiales para cada capa; y finalmente, la fabricación de nanocapas de ZnO.

A. Estudio de propiedades opto-electrónicas

Sobre este tema, se inició un estudio de materiales con estructura de perovskitas de haluros inorgánicos completos de la forma $CsBX_3$, donde B representa elementos como plomo (Pb), estaño (Sn) o germanio (Ge), y el haluro X representa elementos como cloro (Cl), bromo (Br) o iodo (I). Específicamente, se determinaron los parámetros de red, la energía de formación y las bandas prohibidas, todos factores que influyen en la eficiencia y estabilidad de las CSP. Dadas las preocupaciones ambientales asociadas al plomo, este estudio busca analizar estas estructuras sustituyendo el Pb por alternativas más ecológicas como Sn y Ge.

Las Figuras 1 y 2 muestran los resultados de los parámetros de red de equilibrio (a0) y del band-gap (Eg), respectivamente, obtenidos mediante DFT y su comparación con valores determinados de manera experimental obtenidos de la literatura. La barra vertical representa el rango de datos experimentales informados. En ambos casos se encontró una gran correlación lineal. De esta manera, se validaron los modelos computacionales propuestos y se demuestra la precisión predictiva del método computacional DFT empleado. Para todos los compuestos analizados se consideró una supercelda $2 \times 2 \times 2$ con estructura cristalina Pm-3m (221). La franja amarilla de la Figura 2 representa los valores óptimos de band-gap que se

deben utilizar en aplicaciones fotovoltaicas. De esta manera, los compuestos $CsPbCl_3$ y $CsSnCl_3$ están fuera del rango de valores óptimos para ser utilizados en celdas solares.

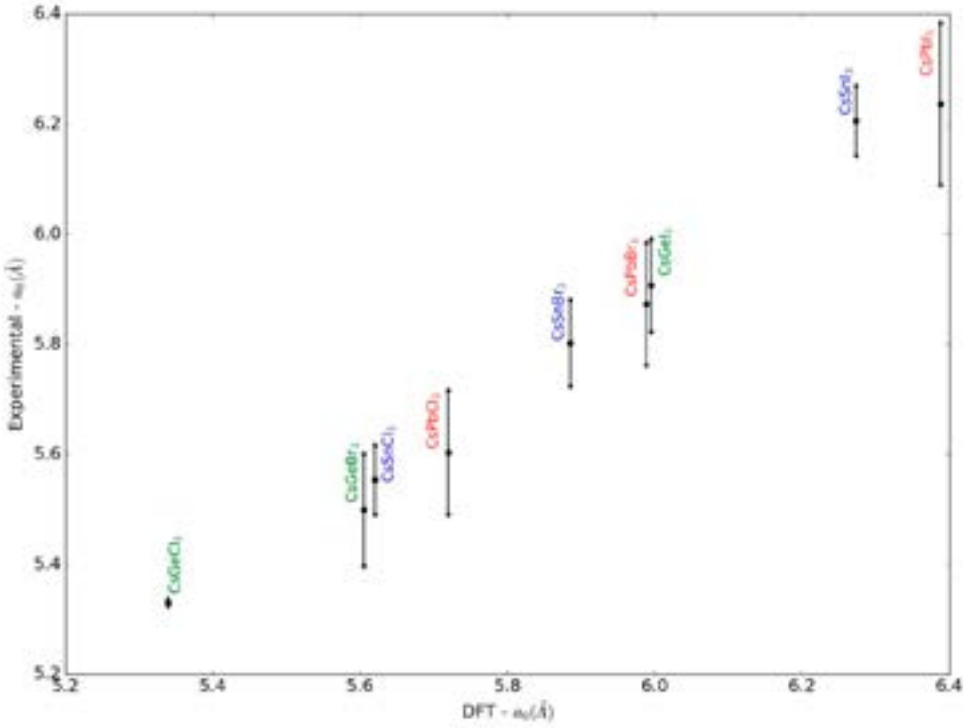


Fig. 1. Correlación de parámetros de red entre valores experimentales y calculados por DFT.

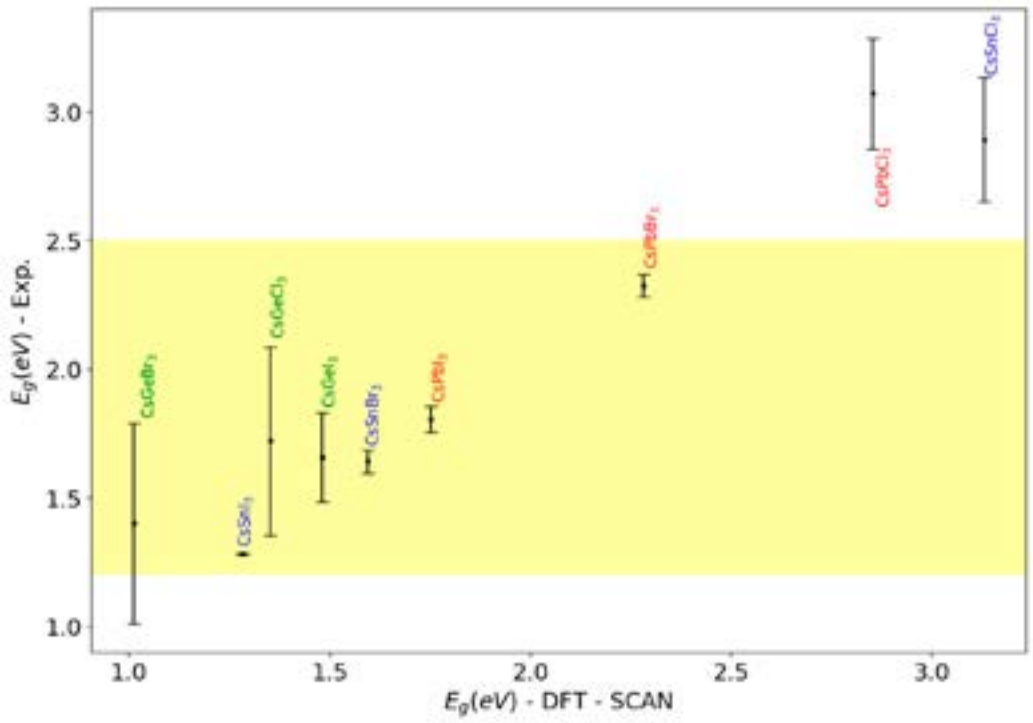


Fig. 2. Correlación de band-gap entre valores experimentales y calculados por DFT.

Por su parte, la Figura 3 muestra la energía de formación para las nueve combinaciones de compuestos de perovskita analizados. La energía de formación permite obtener información sobre la estabilidad estructural del compuesto.

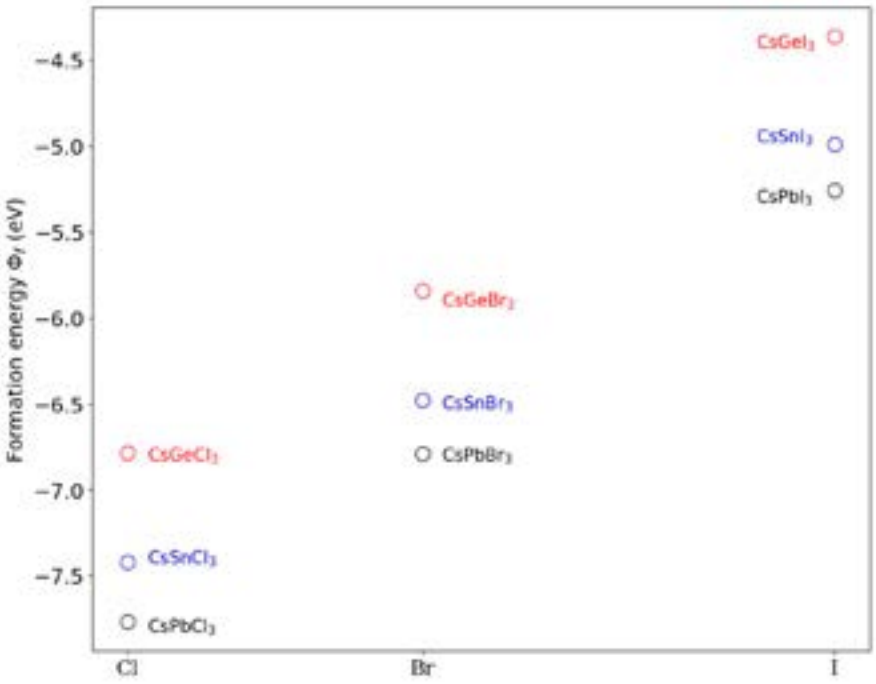


Fig. 3. Energía de formación para las perovskitas $CsBX_3$ (B = Pb, Sn, Ge y X = I, Br, Cl).

B. Estudio de celdas solares de perovskita

En relación con esta área de investigación, hemos estudiado por medio del software SCAPS-1D, el desempeño fotovoltaico de CSP totalmente inorgánicas de estructuras FTO/ETL/$CsBX_3$/HTL/Au (con B = Pb, Sn, Ge y X = I, Br). Se ha utilizado el espectro estándar AM1.5G. Además, se analizaron tres materiales (Cu_2O, CuSCN y CuI) como capa HTL y dos materiales (ZnO y TiO_2) como capa ETL, con el objetivo de determinar la configuración óptima que produce la mayor eficiencia.

Los resultados obtenidos muestran que Cu_2O como HTL y ZnO como ETL tienen un mejor rendimiento que las otras combinaciones consideradas en este estudio, con eficiencias de 15,40% y 9,01% para $CsPbI_3$ y $CsPbBr_3$, respectivamente. Con el fin de reducir la toxicidad de los dispositivos analizados, se han estudiado CSP sin plomo, evaluando el rendimiento de los dispositivos para diferentes espesores en la capa de perovskita para optimizar el diseño de la estructura y mejorar su eficiencia. La estructura ZnO/$CsGeI_3$/Cu2O obtuvo la eficiencia más alta del 18.22%. Las Figura 4 y 5 muestran las curvas corriente-tensión (J-V) (a) y la eficiencia cuántica externa (EQE) (b) para los dispositivos $CsBI_3$ y $CsBBr_3$ (con B = Pb, Ge, Sn), respectivamente.

C. Fabricación y caracterización de nanocapas de ZnO

Por último, se llevó a cabo la fabricación de nanocapas de ZnO utilizando el método de Spray Pyrolysis. Para su caracterización, se utilizaron técnicas como DRX, SEM y espectroscopía UV-Vis. A modo de ejemplo, la Figura 6 muestra el cálculo del band-gap de una muestra de ZnO utilizando la espectroscopía UV-Vis. El valor de ban-gap obtenido de 3.28 eV está en concordancia con otros valores experimentales de la literatura [10].

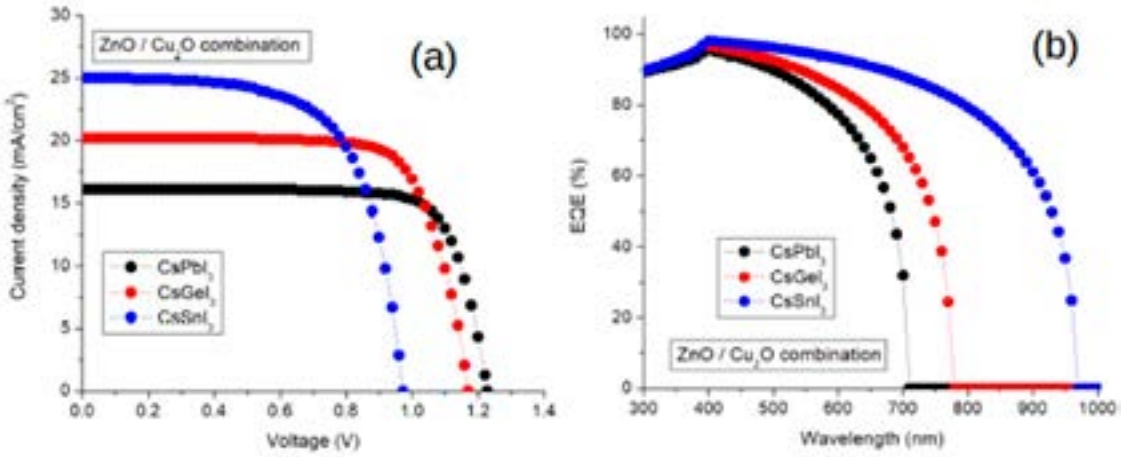


Fig. 4. (a) Curvas J-V y (b) Curvas EQE para CSP con perovskitas $CsBI_3$ (B = Pb, Sn, Ge).

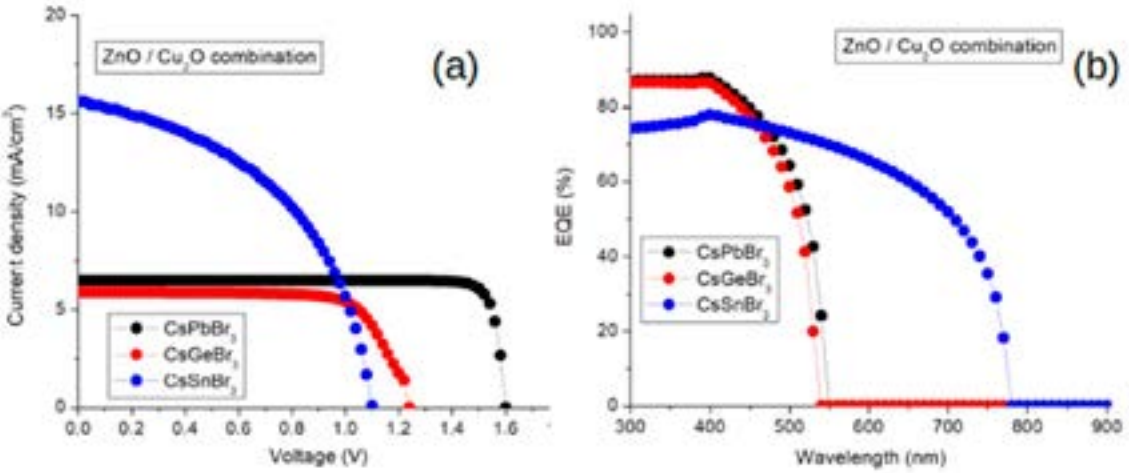


Fig. 5. (a) Curvas J-V y (b) Curvas EQE para CSP con perovskitas $CsBBr_3$ (B = Pb, Sn, Ge).

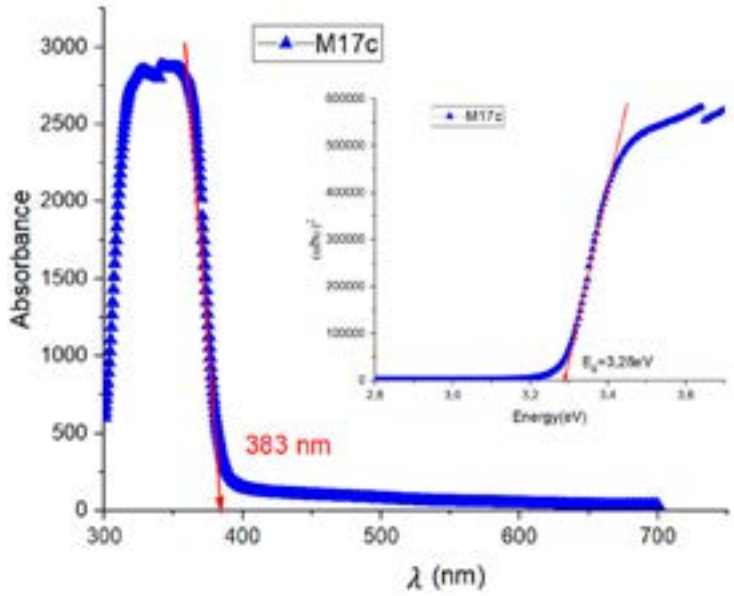


Fig. 6. Espectroscopia UV-vis de la muestra de ZnO.

CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos estudiado las propiedades electrónicas de los materiales perovskitas $CsBX_3$ (B = Pb, Sn, Ge y X = I, Br, Cl), en el marco de la Teoría de la Funcional Densidad (DFT) con el fin de analizar la estabilidad de los compuestos. En concreto, se han calculado el parámetro de red, la energía de formación y el band-gap de cada compuesto y se han comparado con datos experimentales de la literatura, obteniendo una gran correlación lineal entre ellos. Además, el análisis ha permitido descartar a los compuestos $CsPbCl_3$ y $CsSnCl_3$ para su uso en celdas solares.

Por otro lado, se estudiaron celdas solares de perovskita (CSP) totalmente inorgánicos basados en perovskita CsBX3 (B = Pb, Sn, Ge y X = I, Br) mediante simulaciones con SCAPS-1D. Se consideraron varios materiales inorgánicos potenciales para HTL y ETL. Los resultados de la simulación muestran que Cu_2O como HTL y ZnO como ETL tienen un mejor rendimiento que las otras combinaciones consideradas en este estudio. Y la estructura FTO/ZnO/$CsGeI_3$/Cu2O/Au obtuvo la mayor eficiencia, un 18,22 %.

Los resultados de este estudio destacan el potencial significativo de las perovskitas sin plomo como materiales adsorbentes eficaces para CSP de alta eficiencia. Estos conocimientos mejoran nuestra comprensión de las CSP sin plomo y allanan el camino para el diseño y la producción de celdas solares de alto rendimiento y amigables con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Taretto, K., “Celdas Solares, Teoría, Ensayo y Diseño”. Ed. Nueva Librería. Ed. 1º. 2015.

[2] Huang, J., Yuan, Y., Shao, Y., Yan, Y.: Understanding the physical properties of hybrid perovskites for photovoltaic applications. Nat. Rev. Mater. 2, 17042 (2017)

[3] Gao, P., Gratzel, M., Nazeeruddin, M.K.: Organohalide lead perovskites for photovoltaic applications. Energy Environ. Sci. 7, 2448‑2463 (2014)

[4] NREL: Best research-cell efficiencies chart. available online:.

https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf (2024)

[5] Wang, X., Zhang, T., Lou, Y., Zhao, Y.: All-inorganic lead-free perovskites for

optoelectronic applications. Mater. Chem. Front. 3, 365 (2019)

[6] Pinzón, C., Martínez, N., Casas, G., Alvira, F.C., Denon, N., Brusasco, G., Medina Chanduví, H., Gil Rebaza, A.V., Cappelletti, M.A.: Optimization of inverted all-inorganic CsPbI3 and CsPbI2Br perovskite solar cells by SCAPS-1D simulation. Solar 2, 559‑571 (2022)

[7] Li, B., Zhang, Y., Fu, L., Yu, T., Zhou, S., Zhang, L., Yin, L.: Surface passivation engineering strategy to fully-inorganic cubic CsPbI3 perovskites for high-performance solar cells. Nat. Commun. 9, 1076 (2018)

[8] Kresse, G., Furthm¨uller, J.: Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. Computational Materials Science 6, 15‑50 (1996)

[9] Burgelman, M., Nollet, P., Degrave, S.: Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. Thin Solid Films 361-362, 527‑532 (2000)

[10] Detert, D.M., Lim, S., Tom, K., Luce, A.V., Anders, A., Dubon, O.D., Yu, K.M., Walukiewicz, W.: Crystal structure and properties of CdxZn1-xO alloys across the full composition range. Applied Physics Letters 102, 232103 (2013)

BASTON INTELIGENTE PARA CIEGOS

Autores: Ferrari Flavio A., Cervantes Flores Diego, Mealla Elias.

UIDET UNITEC – FI UNLP – 48 y 115 - eliasmealla@gmail.com

Introducción:

El presente trabajo detalla la solución implementada para desarrollo de un bastón para ciegos y/o disminuidos visuales con retroalimentación auditiva y vibratoria. La función principal del bastón permite a los beneficiarios recibir una respuesta auditiva y vibratoria y así facilitar su movilidad y seguridad, logrando una mejor percepción de su entorno.

El proyecto del bastón para retroalimentación auditiva y vibratoria, es una ramificación del proyecto ”Bastón inteligente”, que fue desarrollado y propuesto por los alumnos Martinez Ulises y Diego Cervantes, y busca simplificar el mismo, quitando las funcionalidades de GPS, Bluetooth y App móvil, para obtener las funciones primitivas y funcionales (batería, sensores, woofer o parlante, microprocesador, botones) obteniendo así, un primer prototipo funcional sin tantas complicaciones, errores y amigable con el usuario (para todo rango de edades).

Parte experimental:

El proyecto general consiste en la realización de un bastón el cual puede medir la distancia a los obstáculos a través de sus sensores y, a partir de la información captada, responder mediante vibración gracias a un motor, y en forma sonora a través de su woofer. El agregado de una batería de litio le agrega autonomía y fiabilidad.

Posee 4 funcionalidades, de las cuales 3 se pueden activar a través de 2 botones. La primer funcionalidad (y principal), es la de proximidad, que logra que el bastón empiece a emitir vibraciones y sonido de advertencia al detectar un objeto a cierta distancia configurable, la siguiente función es la de poder medir distancia de proximidad al objeto al presionar otro botón anunciándola a través del woofer, la tercera función es la de poder identificar colores primarios, la cual se activa con otro pulsador y al acercar el sensor al objeto identifica el color primario y procede a decirlo por el woofer. Una función adicional es poder habilitar y deshabilitar la advertencia por voz.

El Proyecto se dividió en varias etapas para un mejor abordaje del mismo: estado del arte, estudio y análisis de sensores, programación, armado de un primer prototipo, montaje y pruebas con usuarios finales, montaje y realización del producto final. Todas las etapas están atravesadas con la documentación pertinente.

Estado del arte: esta etapa consistió en analizar el desarrollo anterior para así determinar que se podía reutilizar y que optimizar en este nuevo proyecto.

Estudio y análisis de sensores y programación: se realizaron pruebas con código que proporciona la librería ”SparkFun APDS9960” para el sensor de proximidad / color (Figuras 1 y 2), y para el sensor HC-ST04 se usaron las funciones básicas proporcionadas por Arduino Uno.



Figura 1: Módulo Sensor Ul- trasónico HC-SR04



Figura 2: Módulo sensor de Color, Gestos y RGB GY-9960

Respecto al código, se analizó y optimizó el existente en el proyecto precedente agregándole las funcionalidades de detección de color y estado de la batería.

Armado del primer prototipo: en la Figura 3 se muestra el esquemático del circuito utilizado para el primer modelo.

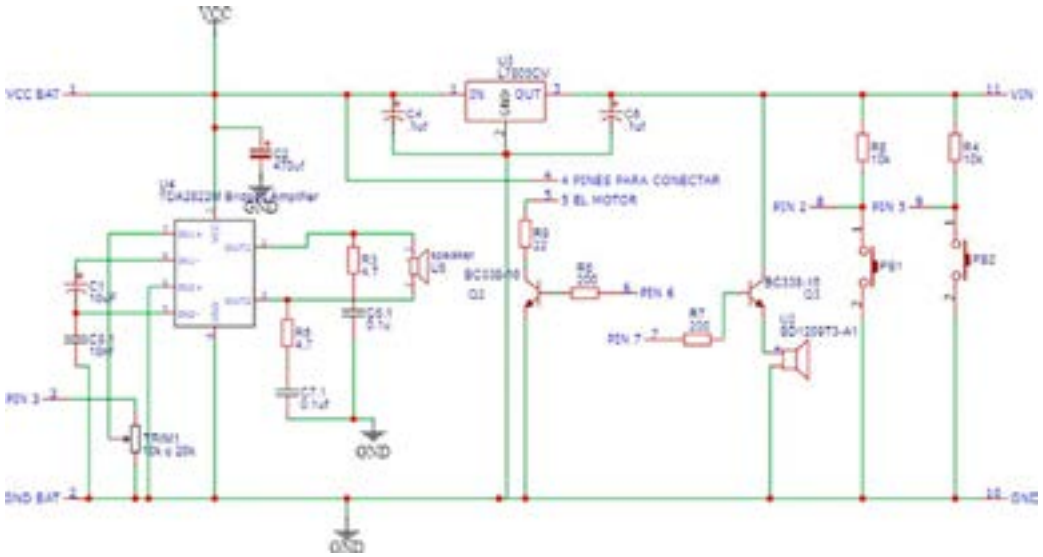


Figura 3: Esquemático del circuito principal.

Problemas y soluciones:

1) se detectó que el funcionamiento del Arduino UNO no era el óptimo en función de la demanda al que estaba sometido, por lo que se resolvió alimentarlo con un regulador de tensión adicional (Figura 4)

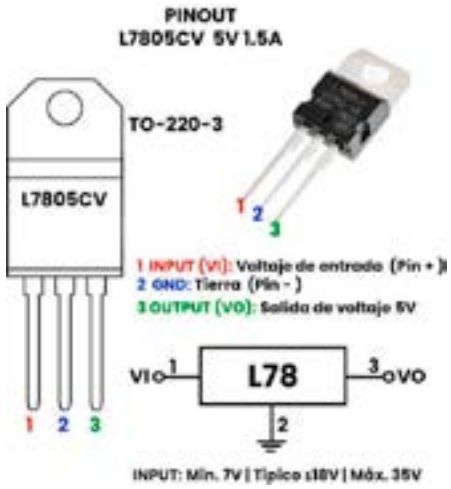


Figura 4: Regulador de tensión L7805CV.

2) Al motor vibrador (Figura 5) se lo adaptó para disminuir el consumo de corriente lo cual reiniciaba el módulo Arduino.



Figura 5: Motor vibrador.

3) Asimismo se detectó en las pruebas preliminares un bajo sonido en el woffer por lo que se optó por implementar un amplificador de sonido para lo que se analizaron 2 opciones, utilizar un integrado “PAM 8403” o un amplificador de sonido con componentes existentes en el taller.

Al probar el PAM 8403 hubo complicaciones porque se escuchaba con alta ganancia, y el audio tenía sonidos agudos innecesarios y molestos. Se detectó que la

causa del problema era la inestabilidad del formato de audio investigando la librería ”talkingu¨ que utiliza PWM, por lo cual se descarta esta posibilidad.

En su reemplazo, se prosiguió a la utilización de un amplificador de sonido, el LM386 para lo cual se creó un circuito como propone el datasheet del proveedor (Figura 6) que si bien arrojó mejores resultados pero con menor potencia que la opción del PAM y un poco mayor que sin amplificador, fue suficiente para cerrar el prototipo y seguir avanzando con el proyecto.

Como los problemas con el audio seguían (interferencias, ruido, etc) se optó por utilizar un TDA2822M, integrado muy usado en parlantes de computadoras comerciales solucionando asi los problemas existentes.

Armado de un primer prototipo, montaje:

Una vez realizadas todas las pruebas correspondientes y verificado su correcto funcionamiento en el protoboard se realizó el primer prototipo con 2 placas experimentales perforadas, una 5x5 cm con los sensores y led y otra de 10x5 cm con los botones, amplificador, motor, entre otros; además se separó la parte de 10 volts de la parte de 5 volts, y se estableció una GND en común de la batería con el de la placa experimental y el Arduino.

Para la conexión entre el módulo de sensores con el Arduino se utilizó un cable UTP CAT5 (utilizado para redes LAN), ya que los sensores requerían 8 conexiones, como se describe en la Figura 7.



Figura 6: Conexionado entre módulo de sensores y microcontrolador.

Análisis del funcionamiento.

Teniendo integrado todo el proyecto en un primer prototipo separados en módulos (módulo de batería, módulo de circuito y módulo de sensores), se realizaron las pruebas pertinentes de detección de proximidad y de color con resultados acordes a lo esperado.



Figura 7: módulos PCB implementados (frente)



Figura 8: módulos PCB implementados (dorso)



Figura 9**:** producto final.

Resultados

Los resultados obtenidos son acordes a las especificaciones logrando un producto liviano, portable, escalable en funcionalidades y adaptable a distintos bastones comerciales. Tanto la respuesta vibratoria como auditiva de detección de proximidad a un objeto, se corresponden con lo esperado. Las funciones adicionales de salida de auricular y detección de color aportan innovación a los “bastones inteligentes” existentes en el mercado

Discusión

Como tarea a futuro podría reducirse el case (receptáculo del circuito general) y agregar funciones inalámbricas de audio. Se espera que este desarrollo como herramienta de accesibilidad aporte a la comunidad no vidente una solución de bajo costo que mejore su calidad de vida a traves del uso de la tecnología hoy existente.

Conclusiones

Se ha concluido exitosamente el proyecto de bastón para ciegos con retro alimentación auditiva vibratoria. No solo se alcanzó el objetivo principal establecido, sino que también se logró integrar el proyecto con la menor complejidad posible.

Durante el desarrollo del trabajo se abordaron técnicas y conocimientos adquiridos durante la carrera, sobre todo taller de Sistemas Digitales.

Bibliogarfía / Referencias

- sparkfun, HC - SR04, Disponible: DATASHEET.
- sparkfun, APDS-9960, Disponible: DATASHEET.
- STMicroelectronics, POSITIVE VOLTAGE REGULATOR,L7805CV, Disponible: DATASHEET.
- BK8000L , BK8000L, Disponible: DATASHEET.
- PAM8403 , PAM8403, Disponible: DATASHEET.
- TDA2822M , TDA2822M , Disponible: DATASHEET.
- Informe de Di Paolo, Camilo y Valdez, Gaston , github , Disponible: DATASHEET.

Sobre bastones para ciegos:

- TeleTact II (HIO55) - http://www.limsi.fr/Individu/bellik/ - TeleTact/TeleTact.htm – Comercializa CNRS
- https://www.procertecnologias.com/products/ - Empresa dedicada a soluciones tecnológicas para personas con discapacidad visual.
- https://www.escueladeroboticamisiones.com/node/672 - Escuela de robótica – Misiones.

ESTUDIO COMPARATIVO DE DISEÑO Y MEDICIÓN DE TRES ANTENAS PARA SU USO EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN IoT

GROSS, Patricio; CIAFARDINI, Juan Pablo; VERNIERI, Julieta

Departamento de Electrotecnia- Facultad de Ingeniería-UNLP. Calle 48 y 116. La Plata
patriciomgross@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presentan y comparan tres diseños de antenas orientados a aplicaciones LoRa en la banda de 400 MHz con el objetivo de analizar su desempeño en términos de eficiencia y alcance en sistemas de comunicación IoT. Las antenas evaluadas son: (1) antena comercial, (2) monopolo de cuarto de onda con plano de tierra y (3) antena Yagi de cinco elementos [1]. La primera de ellas es la antena que se comercializa en el país junto con el módulo LoRa, mientras las otras dos fueron diseñadas y construidas para el presente trabajo.

El análisis incluye una caracterización detallada de cada antena basada en simulaciones electromagnéticas y mediciones experimentales. Los parámetros evaluados abarcan la ganancia, los coeficientes de reflexión (S11) y el cálculo de presupuestos de enlace para diversas condiciones de operación. Adicionalmente, se evalúa la relación entre las características físicas de cada diseño, como tamaño y complejidad, frente a su rendimiento en términos de cobertura y estabilidad del enlace.

Los resultados obtenidos resaltan las diferencias significativas entre las antenas. La antena comercial muestra ventajas en aplicaciones compactas, pero con menor ganancia; el monopolo de cuarto de onda ofrece un equilibrio entre simplicidad y desempeño; y la antena Yagi destaca por su alta ganancia y eficiencia en enlaces de larga distancia, aunque a costa de un mayor tamaño y complejidad de construcción.

Este estudio busca proporcionar un marco de referencia útil para la selección de antenas en proyectos IoT, donde el diseño influye directamente en la eficiencia energética, la cobertura y la estabilidad del enlace.

Introducción

En los últimos años, el desarrollo de redes de sensores inalámbricos ha impulsado la adopción de tecnologías de comunicación de largo alcance y bajo consumo energético. Entre estas tecnologías, LoRa (Long Range) se ha consolidado como una de las soluciones más eficientes para la transmisión de datos en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), debido a su capacidad para operar en bandas de frecuencia sin licencia y debido su robustez frente a interferencias.

La tecnología LoRa emplea modulación por Chirp Spread Spectrum (CSS), lo que permite alcanzar grandes distancias de comunicación con una alta inmunidad al ruido y un bajo consumo de energía. Esto la convierte en una tecnología ideal para aplicaciones donde los dispositivos deben funcionar con baterías durante largos períodos de tiempo, como en monitoreo ambiental, agricultura de precisión, infraestructura inteligente y redes de sensores remotos.

Sin embargo, el desempeño de los enlaces LoRa no solo depende de la configuración del protocolo, sino que también está altamente influenciado por la elección y diseño de las antenas utilizadas. La optimización del sistema de transmisión requiere seleccionar antenas que maximicen la eficiencia, la cobertura y la estabilidad del enlace sin comprometer la portabilidad y el bajo consumo de los dispositivos.

Este trabajo presenta un estudio comparativo del desempeño de tres antenas. Dos de ellas fueron diseñadas y construidas para operar en la banda de 433 MHz, una de las frecuencias más utilizadas para LoRa en aplicaciones IoT, y la tercera es la antena comercial que se vende junto con los dispositivos LoRa. Las antenas diseñadas son un monopolo con

plano de tierra y una antena Yagi de cinco elementos con Gamma Match [2], mientras que la adquirida en el comercio es una antena tipo monopolo compacto. A través de simulaciones y mediciones experimentales, se comparan los desempeños evaluando parámetros clave como la respuesta en frecuencia (S11), la potencia recibida (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR), con el objetivo de determinar cuál de las tres antenas ofrece el mejor desempeño en un entorno real.

Antenas evaluadas

Antena comercial

Las antenas que se venden con los módulos de LoRa son monopolos cortos y se consiguen de entre 5 y 9 cm de longitud. La antena comprada y analizada tiene una longitud de 8 cm y se muestra en la Figura 1:



Figura 1 – Antena comercial para módulo LoRa

Si bien estas antenas son compactas y económicas, se puede observar por su longitudque fueron diseñadas para una mayor frecuencia que es la que típicamente se utiliza para WiFi (2,4Ghz). Esto hace que su desempeño para 433 Mhz se vea notoriamente disminuido.

Monopolo cuarto de onda con plano de tierra

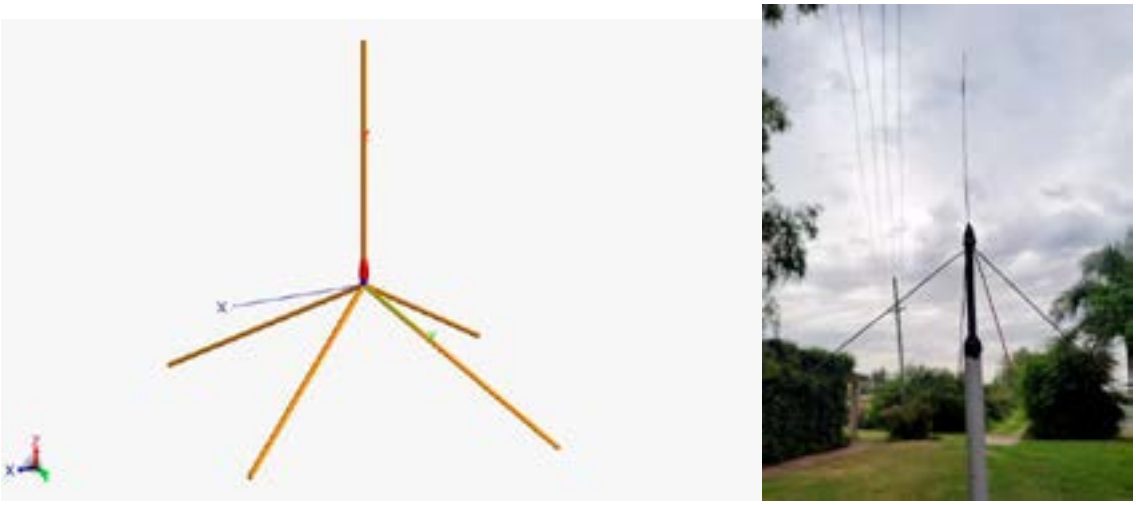
Se diseñó un monopolo con plano de tierra para operar en la banda de 433 MHz. Como antena de cuarto de onda, la longitud del elemento radiador está dada por:

$$L = \frac{1}{4}\frac{c}{f} \qquad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y f la frecuencia de operación. Para 433 MHz, la longitud resulta de 17,3 cm.

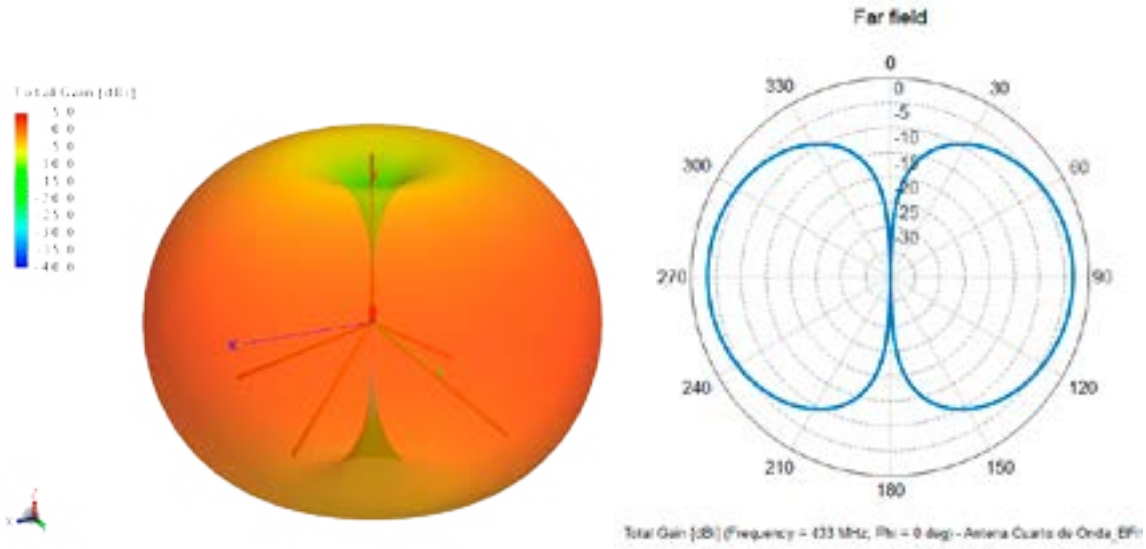
Se realizaron simulaciones para validar este diseño y posteriormente se construyó con un conductor central y un plano de tierra conformado por cuatro conductores inclinados a 45°, mejorando la adaptación de impedancia con respecto a un monopolo sin plano de tierra.

En la Figura 2a se muestra la antena monopolo simulada y en la Figura 2b la antena construida. En la Figura 3a se vuelca el diagrama de radiación 3D y en la Figura 3b el diagrama de radiación 2D del cual se puede obtener el parámetro Ganancia que arroja la simulación. En la Figura 4 se muestra el parámetro S11.



a) b)

Figura 2 – Antena monopolo de cuarto de onda: a) diseño de simulación b) antena construida



a) b)

Figura 3 – Antena monopolo de cuarto de onda: a) Diagrama de radiación 3D, b) Diagrama de radiación 2D (Ganancia), según la simulación.

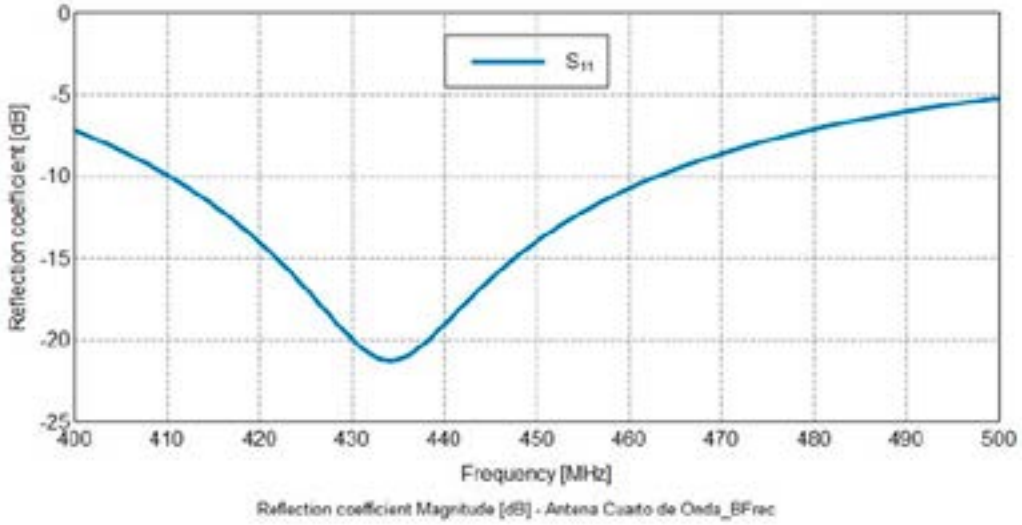


Figura 4 – Coeficiente de Reflexión (parámetro S11) de la antena monopolo de cuarto de onda, según la simulación.

Antena Yagi de cinco elementos

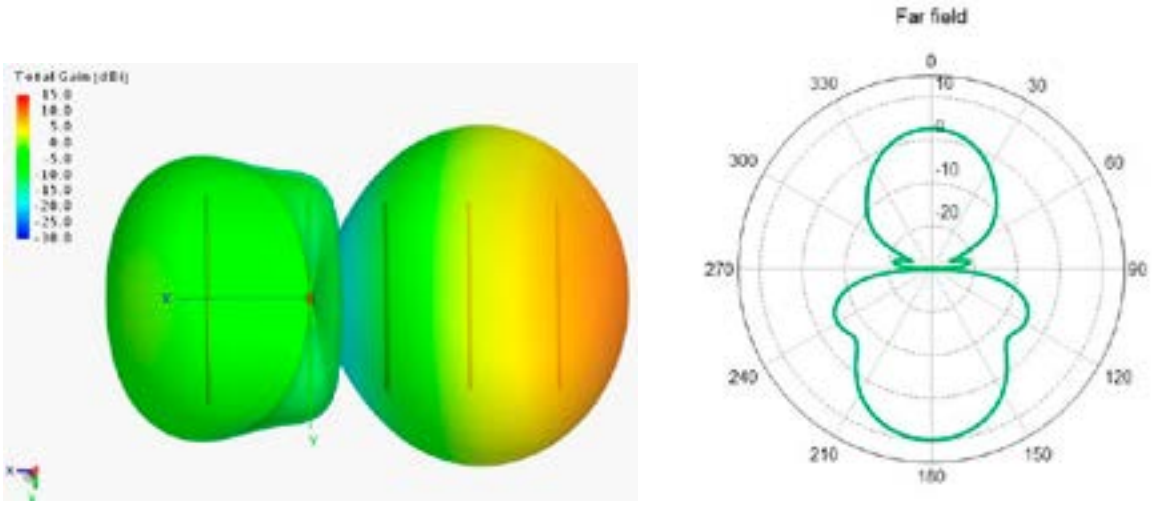
Se diseñó una antena Yagi de cinco elementos a partir de un elemento reflector, un elemento activo y tres directores para mejorar la directividad y la ganancia. La longitud del dipolo activo es de aproximadamente 17,3 cm, con un espaciamiento entre elementos optimizado para la banda de 433 MHz. La adaptación de impedancia se realizó mediante un Gamma Match, una técnica que emplea un lazo de alimentación en paralelo al dipolo para mejorar la transferencia de potencia al alimentador y minimizar pérdidas por desadaptación. Este método permite un ajuste preciso de la impedancia sin necesidad de componentes adicionales.

En la Figura 5a se muestra la antena Yagi de cinco elementos simulada y en la Figura 5b la antena construida. En la Figura 6a se vuelca el diagrama de radiación 3D y en la Figura 6b el diagrama de radiación 2D del cual se puede obtener el parámetro Ganancia que arroja la simulación. En la Figura 7 se muestra el parámetro S11.



a) b)

Figura 5 – Antena Yagi de cinco elementos: a) diseño de simulación b) antena construida



a) b)

Figura 6 – Antena Yagi,: a) Diagrama de radiación 3D, b) Diagrama de radiación 2D (Ganancia), según la simulación.

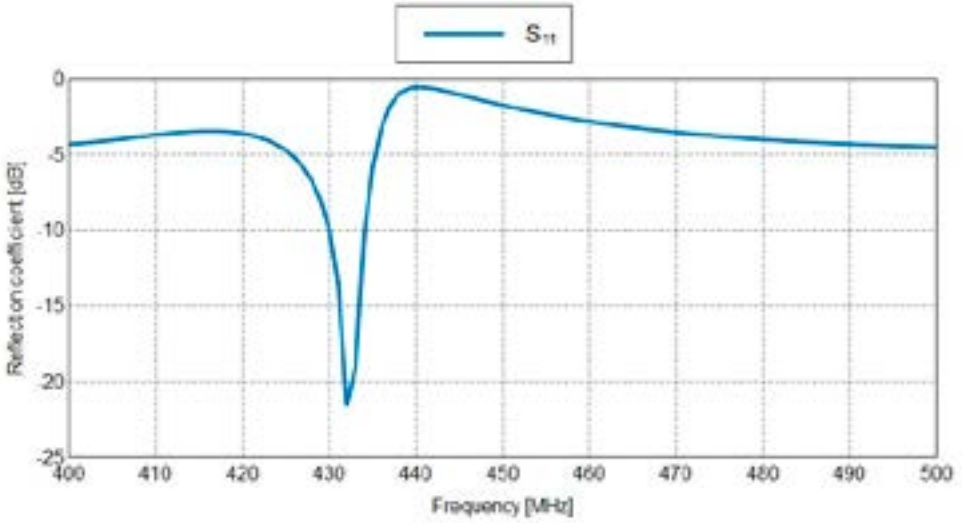


Figura 7 – Coeficiente de Reflexión (parámetro S11) de la antena Yagi, según la simulación.

Resultados de las mediciones

Se realizaron mediciones del parámetro de reflexión (S11) para la frecuencia de 433 MHz en las tres antenas: monopolo comercial, monopolo construido y antena Yagi. Los valores se vuelcan en la Tabla I.

A su vez se analizaron cuatro diferentes enlaces a partir de distintas configuraciones conformadas por dos dispositivos LoRa ubicados a 20 metros de distancia entre ellos. Para cada configuración se midió la potencia de señal recibida (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR). Los valores medidos se vuelcan en la Tabla II.

Tabla I - Valores medidos del parámetro S11@433 MHz

Valores		
Antena comercial	Monopolo construido	Antena Yagi
-4,2 dB	-26,2 dB	-23,5 dB

Tabla II- Valores medidos de los parámetros RSSI y SNR para diferentes enlaces

Enlace	Parámetro RSSI	Parámetro SNR
antena comercial - antena comercial	-82 dB	10 dB
antena comercial - monopolo construido	-74 dB	11 dB
antena comercial - antena Yagi	-69 dB	11 dB
monopolo construido - antena Yagi	-54 dB	12 dB

De la Tabla I se deduce que los valores medidos de S11 arrojan que tanto el monopolo construido como la antena Yagi presentan una mejor adaptación de impedancia en comparación con la antena comercial.

De la Tabla II se puede concluir que el monopolo construido mejora la recepción en comparación con el monopolo comercial, debido a un mejor plano de tierra. Esto también es consecuencia de que la antena comercial no está sintonizada para la frecuencia de operación. La antena Yagi, al ofrecer mayor ganancia y directividad, proporciona el mejor desempeño en términos de potencia recibida y SNR.

Conclusiones

Los resultados obtenidos resaltan las diferencias significativas entre las antenas. La antena comercial muestra ventajas en aplicaciones compactas, pero con menor ganancia; el monopolo de cuarto de onda ofrece un equilibrio entre simplicidad y desempeño mientras que

la antena Yagi destaca por su alta ganancia y eficiencia en enlaces de larga distancia, aunque a costa de un mayor tamaño y complejidad de construcción.

El estudio demuestra que la selección de antenas impacta significativamente en el rendimiento de las comunicaciones LoRa. Mientras que el monopolo construido mejora las prestaciones respecto a las opciones comerciales, la antena Yagi resulta ser la más eficiente para escenarios que requieren mayor cobertura y estabilidad de enlace. Para redes de sensores punto multipunto, debe tenerse en cuenta que la antena Yagi es direccional, con lo cual un buen esquema de funcionamiento podría ser la utilización del monopolo en el nodo central y antenas Yagi en los nodos secundarios.

Otra importante conclusión es que las antenas que hoy, en Argentina, están en general disponibles en los comercios para el módulo LoRa, no son las más adecuadas por lo que terminan por desaprovechar las ventajas de esta tecnología de largo alcance.

Los resultados obtenidos sirven como referencia para futuras implementaciones de redes LoRa en 433 MHz.

Referencias

[1] Á. Cardama Aznar, L. Jofre Roca, J. M. Rius Casals, J. Romeu Robert, S. Blanch Boris, and M. Ferrando Bataller, “Antenas”. Edicions UPC, 2002.
[2] K Rothammels, A Krischke,” Antennenbuch”, Verlag Baunatal, 2001.
[3] J Kraus, “Antennas”. McGraw-Hill, New York, 1988
[4] “Transmitting antenna characteristics at VHF and UHF,” ITU, Recommendation ITU-R BT.1195-1, 2013.
[5] A. Burberry, “VHF and UHF Antennas”, Volumen 35 de Institution of Electrical Engineers: IEE electromagnetic waves series. Editor, IET, 1992

Y-ROCK: Estudio de factibilidad y diseño preliminar de robot para inspección de coronas geológicas

Juan Luis Rosendo, Gerónimo Gonzalez Marino, Fabricio Garelli

Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 1900.
E-mail: juanluis.rosendo@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta un estudio de factibilidad técnica para el desarrollo de un robot destinado al ensayo y medición de coronas geológicas obtenidas en exploraciones petrolíferas. Estas coronas consisten en cilindros de roca seccionados en tramos de aproximadamente un metro de longitud (ver Figura 1) y muestras de cutting de perforación (ver Figura 2). Las muestras deben analizarse a intervalos específicos para caracterizar los materiales encontrados a diferentes profundidades de perforación. Este análisis se realiza utilizando diversos instrumentos, como colorímetros, analizadores de susceptibilidad magnética y analizadores de aleaciones. La operación manual de estos instrumentos es un proceso lento, ya que algunas mediciones pueden tardar entre 1 y 2 minutos. Además, el uso de estos equipos expone a los operadores a la radiación generada por los propios instrumentos.
La combinación de estos factores, junto con el volumen de muestras que deben analizarse, motivó al Laboratorio de Sedimentología y Petrografía de la empresa Y-TEC a buscar una solución automatizada. En este contexto, el laboratorio LEICI de nuestra facultad contribuye con su experiencia en robótica y automatización, realizando inicialmente un estudio de factibilidad y, posteriormente, desarrollando un prototipo del sistema automatizado [1].

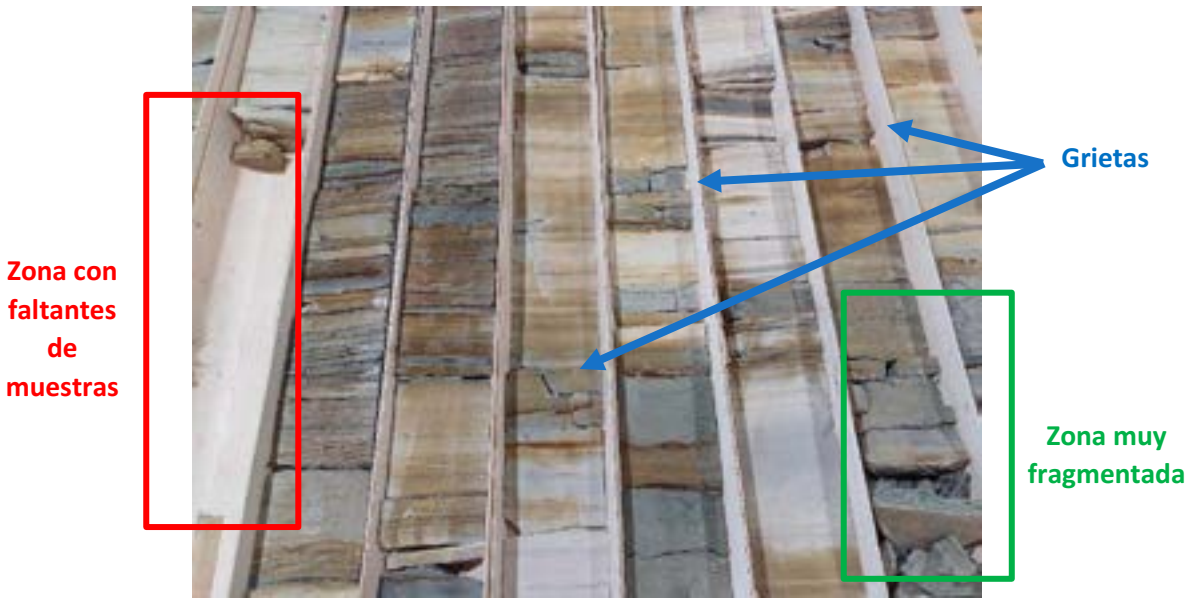


Figura 1. Ejemplo de muestra de corona geológica a medir con distintas condiciones de medición.



Figura 2. Muestra de cutting en formato de almacenamiento.



Figura 3. Soporte plástico para muestra de cutting.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Ensayos de instrumentos:

El primer paso hacia el diseño del automatismo consistió en analizar el modo de funcionamiento y la posibilidad de disparo remoto de los instrumentos involucrados. Para ello, se realizó un estudio de las características de cada equipo, determinando las interfaces de conexión y desarrollando un código (en lenguaje C++), ad hoc para cada uno, con el fin de permitir su disparo de manera automática. A continuación, se presentan los tipos de medidas que se realizarán, junto con las observaciones correspondientes:

a) **Medición de color de muestra**, para esta medición actualmente se utiliza en forma manual el instrumento CLM – 194 [2], el cual debe ser acercado a la muestra para realizar la medición. Se determinó que este instrumento no puede ser utilizado en una automatización debido a limitaciones en su disparo remoto, por lo que se propuso la versión industrial del mismo, CLM – 195 [3]. Este nuevo instrumento requiere una distancia de aproximación entre 6 y 12 mm de las muestras para obtener medidas válidas, como se muestra en Figura 4. Además, cabe destacar que cuenta con una interfaz de comunicación RS-485.

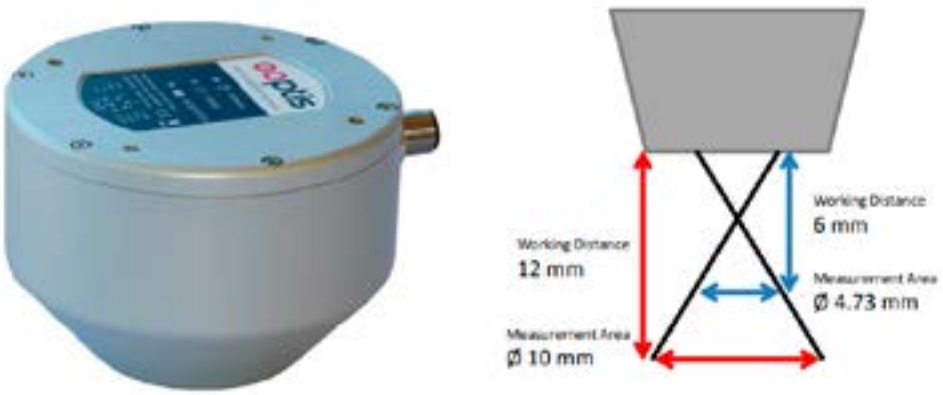


Figura 4. Instrumento CLM-195 y diagrama de medición.

b) **Medición de susceptibilidad magnética**, para esta medición se utiliza el instrumento de medida MS2 [4], el cual debe hacer contacto con la superficie a medir como se muestra en la Figura 5.



Figura 5 Medición instrumento MS2.



Figura 6. Medición instrumento XL 3t Gold+.

Se mostró la posibilidad de automatización de la medida de este instrumento, donde la mayor consideración es que el mismo debe instalarse a no menos de 10cm de estructuras metálicas. En caso de utilizarse, el soporte de este debe ser construido en material no conductor, por ejemplo, en PLA. Adicionalmente se hace notar que este instrumento posee una interfaz de comunicación RS-232.

c) **Análisis de aleaciones,** esta medición se realiza mediante el instrumento XL 3t Gold + [5], el cual permite automatizar su medición a través de una interfaz USB, utilizando librerías propietarias del fabricante. El proceso de medición consiste en el contacto físico del instrumento con la muestra (Figura 6).

d) **Captura de imagen de alta resolución**, originalmente, no se disponía del instrumento para capturas de imágenes de alta resolución, por lo que se estableció como un requerimiento para un posible automatismo. Se determinó que una cámara de disparo remoto, conectada mediante interfaz USB, con una resolución de 20 megapíxeles y accesorios necesarios para utilizarla a una distancia máxima de 18 cm (con el objetivo de que el área de captura sea de 15 x 15 cm), junto con un kit de iluminación que garantice un nivel de iluminación uniforme en todas las muestras analizadas, cumpliría con los requisitos de medida. De las variantes comerciales disponibles, se recomendó el modelo MV-CS200-10UM/UC de la marca Hikrobot como el equipo potencial a utilizar, por su equilibrio entre características técnicas y costo.

Análisis del tipo de muestras:
La segunda parte del análisis de factibilidad consistió en estudiar el tipo de muestras que se analizarán con los equipos previamente mencionados.

a) **Medición de corona geológica**, las muestras de corona geológica tienen un ancho variable de 5 a 10 cm y una longitud de aproximadamente 1,2 m. Se montan sobre un soporte circular o cuna metálica para inmovilizarlas durante la medición (Figura 1). Se identificaron varias dificultades para automatizar este proceso:

- Las muestras deben armarse secuencialmente según la profundidad de perforación, por lo que es necesario incorporar un sistema de referencia relativo (una regla graduada y una indicación del operario serían suficientes).
- El armado de las muestras puede producir zonas de vacío por la falta de muestras (Figura 1).
- Las muestras no son uniformes, frecuentemente están fragmentadas o presentan superficies irregulares, ver Figura 1.
- Los instrumentos no pueden medir sobre grietas, por lo que se debe implementar un sistema que ajuste el punto de medición en caso de encontrarse con una grieta. Dado que las mediciones se toman cada 10 cm, si se encuentra una grieta, se podrá desplazar el instrumento 1 a 5 cm en cualquier dirección.
- Como todos los instrumentos requieren una referencia de altura/contacto, es necesario incorporar un sensor o sistema mecánico para este fin.

b) **Medición de cutting de perforación,** este tipo de muestra consiste en roca granulada en general de tamaño menor a los 10mm. Este material se encuentra catalogado en bolsas plásticas o de papel (ver Figura 2), a partir de las cuales se arman muestras de medición. Estas muestras son analizadas por los mismos instrumentos que los utilizados en las mediciones sobre coronas geológicas. El armado de la muestra de medición consiste en la utilización de un soporte plástico cilíndrico de 30 mm de diámetro y 27 mm de altura, limitado por un film de polipropileno de 4 µm debajo del cual se deposita la muestra (Figura 3). La automatización es viable debido a la estandarización de las muestras, pero es necesario establecer un sistema de referencia relativo para su posicionamiento, como en el caso de las coronas geológicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Automatismo

Considerando los tipos de muestra a analizar, se propone una mesa de trabajo tipo pantógrafo con doble accionamiento vertical, donde los instrumentos acceden a las muestras desde una orientación vertical superior, como se muestra en la Figura 7. Esta configuración permitirá el movimiento en dos dimensiones (X, Y) de los instrumentos, y el control independiente de la altura de medición (Z) de cada uno. Dado el tamaño de las muestras y los volúmenes de trabajo, el automatismo debe cubrir un volumen útil mínimo de 120 x 120 x 30 cm, lo que permitirá acomodar

simultáneamente hasta 10 muestras de coronas geológicas y 1300 muestras de cutting.

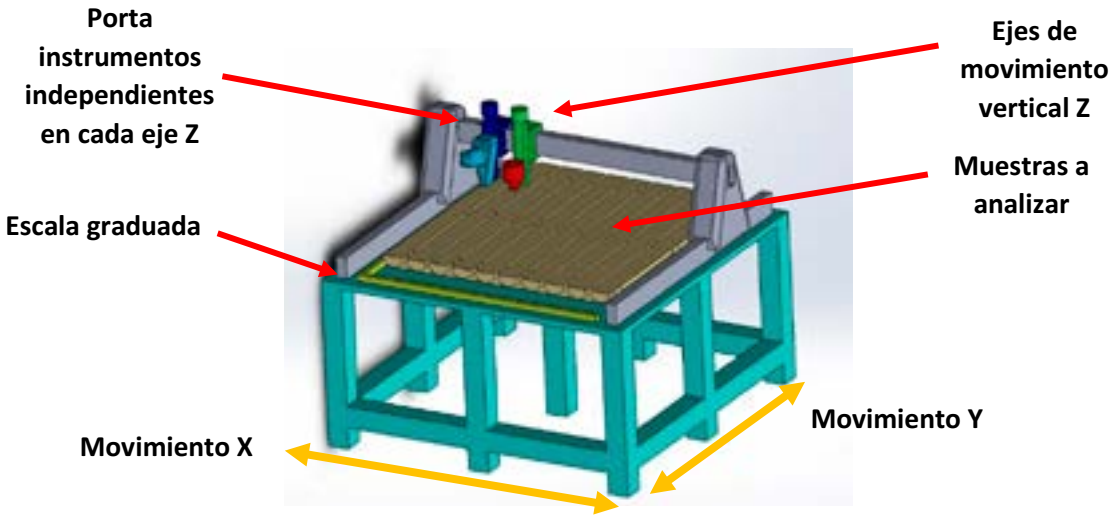


Figura 7. Modelo automatismo basado en pantógrafo móvil y soporte de instrumentos.

El automatismo incluirá una computadora para controlar el movimiento del pantógrafo y coordinar el disparo de los instrumentos. Además, el sistema debe contar con un punto de calibración automática para la altura de los instrumentos y un sistema de referencia con una regla graduada en la superficie de trabajo, lo que permitirá al operador posicionar las muestras según la profundidad de la perforación.
El funcionamiento del automatismo consistirá en realizar mediciones automatizadas de ambos tipos de muestras. El pantógrafo se moverá en las direcciones X e Y para ubicar el instrumento, y el eje vertical correspondiente ajustará la altura para la medición. Un sensor o accionamiento mecánico montado en el eje vertical evitara que el automatismo golpee o presione excesivamente las muestras. Los parámetros de distancia entre mediciones en X e Y serán configurables desde la aplicación de control, así como el punto de inicio de las mediciones, que se podrá definir textual o mediante el posicionamiento del equipo.
Adicionalmente, el sistema detectará anomalías durante la medición, como la falta de muestras o violaciones del espacio de trabajo. Estas situaciones serán gestionadas mediante funciones de error que, en el caso más simple, detendrán la operación hasta que un operador intervenga. Esta determinación puede realizar a partir de imágenes tomadas de la zona de medición a analizar.
Detalles de las características técnicas, así como un presupuesto estimativo, tanto de la parte mecánica como de la computadora de control a utilizar pueden encontrarse en el informe de factibilidad del proyecto [1].

Prototipo y simulación.

Con el objetivo de validar la viabilidad del diseño y visualizar el funcionamiento del sistema, se desarrolló una maqueta conceptual que permitió una primera demostración del equipo (Figura 8). Esta maqueta se centró en movimientos longitudinales y verticales, utilizando sensores de bajo costo y una lógica de control basada en código G [6]. Como paso siguiente, y tras la aceptación del diseño por parte del solicitante, se

procedió al desarrollo de un simulador del equipo a construir, utilizando el software Webots [7]. Este simulador, además de servir como herramienta de visualización, permitió verificar la física de los movimientos propuestos y desarrollar tanto el código de control del robot como la interfaz de usuario. Este enfoque aceleró el proceso de desarrollo, preparando el camino para la construcción física del robot final, asegurando así la coherencia entre el diseño y la implementación real.



Figura 8: Prototipo de automatismo desarrollado en laboratorio.

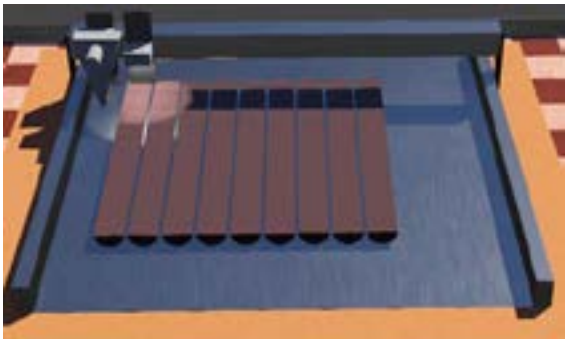


Figura 9: Captura del simulador desarrollado.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una problemática asociada a la automatización en la medición de coronas geológicas y muestras de cutting. Se realizó un análisis de factibilidad de esta automatización, considerando características puntuales tanto de las muestras a analizar como de los instrumentos actualmente utilizados. Finalmente, se propuso un automatismo con las características necesarias para su fabricación, así como una validación de concepto mediante la construcción de un prototipo de bajo costo y un simulador realista del proyecto. Al momento de la redacción de este documento, se avanzaba en la concreción de un convenio entre las instituciones participantes para la construcción del robot diseñado.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Universidad Nacional de La Plata (I283), y el Laboratorio de Sedimentología y Petrografía de la empresa Y-TEC

REFERENCIAS

[1] ST 4563. Estudio de factibilidad de sistema robotizado para inspección automática de coronas geológicas.
[2] Hoja de datos CLM-194. Eoptis electro optical systems. www.eoptis.com
[3] Hoja de datos colorímetro CLM-195. Eoptis electro optical systems.
[4] Hoja de datos MS2. Bartington Instruments. https://www.bartington.com/
[5] Hoja de datos Instrumento Niton XL3t. Thermo Fisher Niton Analyzers. https://www.thermofisher.com/
[6] Scatuerchio, Juan Cruz. Trabajo Final Ingeniería electrónica: Robot de inspección de coronas geológicas.
[7] Webots. Open-source Mobile Robot Simulation Software. http://www.cyberbotics.com.

SIMULACIONES DEL CONTROL DE ORIENTACIÓN DEL USAT-I PARA DETUMBADO Y APUNTAMIENTO SOLAR

Hanisch, Elián

UIDET SENyT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
elian.hanisch@ing.unlp.edu.ar

1 Introducción

El USAT-I es el primer satélite desarrollado en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) y tiene como misión principal la demostración del uso de mediciones de reflectometría y radio-ocultación GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para observación terrestre [1] y la validación de los subsistemas desarrollados que forman parte del satélite, entre ellos, el subsistema de determinación y control de orientación (ADCS *Attitude Determination and Control Subsystem*) [2]. La carga científica consiste en un receptor GNSS de 3 antenas, multifrecuencia y multiconstelación que es una evolución de un receptor anterior desarrollado en la UNLP [3].

En la Fig. 1 se muestra el satélite, es un Cubesat [4] de 3 unidades (30x10x10 cm) con paneles solares fijos en las caras +Y e -Y.

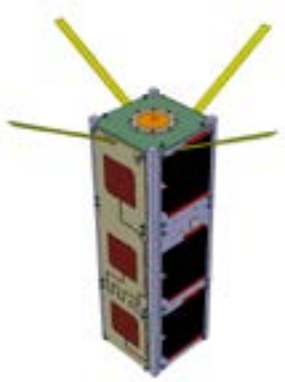


Figura 1: Modelo 3D del USAT-I.



Figura 2: El ADCS siendo ensayado en la configuración Flatsat. Se observa el módulo principal (izq.) y sus actuadores (der.) donde están visibles 2 MTB y la rueda de inercia.

El ADCS es el subsistema responsable de estabilizar el satélite después de su eyección del lanzador y de orientar el satélite para favorecer la carga de las baterías a través de sus paneles solares. Está compuesto por el módulo principal que alberga la electrónica digital, etapas de potencia y acondicionamiento de señales; los sensores compuestos por 6 sensores de sol gruesos (CSS *Coarse Sun Sensors*), 2 ternas de magnetómetros y 2 ternas de giróscopos; y finalmente los actuadores formados por 3 barras magnéticas de torque (MTB *Magnetic Torque Bars*) y una rueda de inercia (Fig. 2).

El ADCS tiene principalmente 2 modos de funcionamiento (Fig. 3): Detumbado (M_1) y Apuntamiento Solar (M_2). El modo M_1 consiste en amortiguar la velocidad angular del satélite a cero. Una vez alcanzada una cierta velocidad umbral automáticamente el ADCS pasa al modo M_2, en este modo el ADCS orienta uno de los paneles solares en dirección al Sol para mantener la carga de las baterías del satélite.

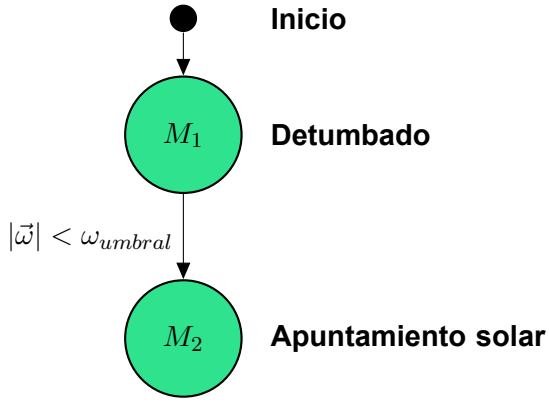


Figura 3: Diagrama simplificado de los modos de funcionamiento.

Los algoritmos de control utilizados en los modos M_1 y M_2 se ensayan a través del simulador 42, que es un simulador de vehículos espaciales de código abierto desarrollado en Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA [5] [6].

2 Desarrollo y resultados

2.1 Nomenclatura y definiciones

$\vec{B}$	Vector del campo geomagnético local [T].
$\boldsymbol{J} = \texttt{diag}([J_x\ J_y\ J_z])$	Matriz de momentos inercia del satélite [kg m^2].
$\vec{\omega} = [\omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T$	Vector de velocidad angular [rad/s].
$\vec{m}$	Vector de momento magnético [A m^2].
$[\vec{v}\times] = \begin{bmatrix} 0 & -v_3 & v_2 \\ v_3 & 0 & -v_1 \\ -v_2 & v_1 & 0 \end{bmatrix}$	Matriz antisimétrica de $\vec{v}$ tal que $[\vec{v}\times]\vec{a} = \vec{v} \times \vec{a}$.
$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{1:3} \\ q_4 \end{bmatrix}$	Cuaternión, siendo $\boldsymbol{q}_{1:3}$ su parte vectorial y q_4 su parte escalar.

2.2 Leyes de control

En esta sección definiremos las leyes de control que serán evaluadas en las simulaciones. No es el propósito de este trabajo mostrar los detalles de sus demostraciones – el lector puede recurrir a la bibliografía citada – solamente se proveerá de las definiciones de cada control.

2.2.1 Detumbado

Para realizar el detumbado se evaluarán 2 algoritmos diferentes: (1) y (2) [7].

$$\vec{m} = -\frac{k_1}{\|\vec{B}\|}\,\dot{\vec{B}} \tag{1}$$

$$\vec{m} = -\frac{k_2}{\|\vec{B}\|^2}\,[\vec{B}\times]\boldsymbol{J}\vec{\omega} \tag{2}$$

Donde $\vec{m}$ es el momento magnético que representa el comando para los MTB para generar el torque deseado, $\vec{B}$ es el campo magnético local medido por el magnetómetro y $\vec{\omega}$ la velocidad

angular medido por el giróscopo. k_1 y k_2 es la ganancia de cada control.

El algoritmo en (1) es ampliamente conocido como control *b-dot*. Se puede observar que solamente requiere la medición de un sensor, el magnetómetro, mientras que (2) requiere además de un giróscopo. Esto hace que (1) sea atractivo por su simplicidad, pero tiene la desventaja de que, dado a que usa las variaciones del campo magnético para detectar la rotación del satélite, no podrá reducir la velocidad angular por debajo de la rotación orbital, que para la órbita del USAT-I es del orden de 0,06 °/s.

2.2.2 Apuntamiento solar

Para hacer el apuntamiento solar se propone un control proporcional-derivativo: (3) [8].

$$\vec{u} = -k_p \boldsymbol{J}^{-1} \boldsymbol{q}_{1:3} - k_d \boldsymbol{J} \vec{\omega} \tag{3}$$

Siendo $\vec{u}$ el torque de la acción de control y $\boldsymbol{q}_{1:3}$ la parte vectorial del cuaternión del error entre el vector normal del panel solar y el vector de dirección al Sol. k_p y k_d son las ganancias proporcional y derivativa respectivamente.
Dado que $\vec{u}$ es un torque, el momento magnético requerido por los MTB se computa con:

$$\vec{m} = \frac{[\vec{B}\times]}{\|\vec{B}\|^2}\vec{u} \tag{4}$$

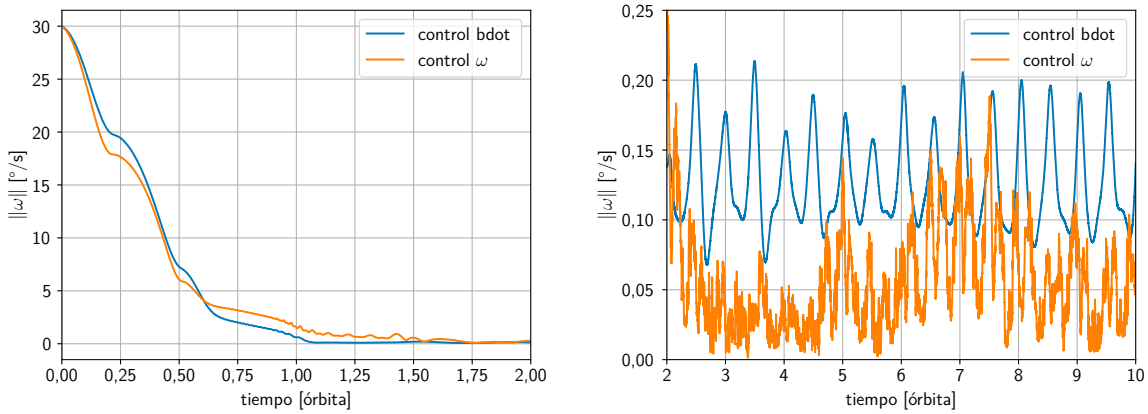
2.3 Simulaciones

2.3.1 Parámetros de simulación

$$k_1 = 5 \quad k_2 = 0{,}01 \quad k_p = 7{,}5 \times 10^{-9} \quad k_d = 0{,}005 \quad \boldsymbol{J} = \texttt{diag}([0{,}031\ 0{,}031\ 0{,}007])$$

2.3.2 Modo de detumbado

En la Fig. 4 se puede observar los resultados se las simulaciones del modo de detumbado. De la Fig. 4a se concluye que la velocidad de convergencia es similar para los 2 algoritmos; de la Fig. 4b se concluye que el control (2) logra reducir la velocidad angular a valores menores que las del control (1).



(a) Velocidad angular inicial de 30 °/s.

(b) En estado estacionario durante 8 órbitas.

Figura 4: Comparación entre las leyes de *control bdot* (1) y *control* ω (2). Una órbita es aproximadamente 90 minutos.

2.3.3 Modo de apuntamiento solar

Dado que a priori no se conoce exactamente los parámetros de la órbita que tendrá el USAT-I, hay incertidumbres sobre si su órbita heliosíncrona presentará eclipses o no. Por lo tanto se realizaron simulaciones con una órbita optimista sin eclipses (Fig. 5) y una órbita pesimista con eclipses (Fig. 6).

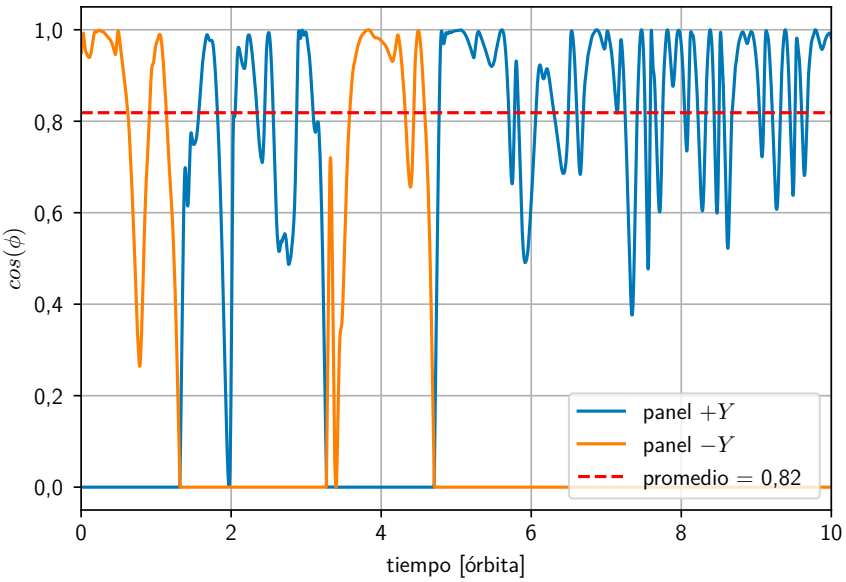


Figura 5: Apuntamiento solar durante 10 órbitas para el caso de una órbita sin eclipse. ϕ representa el ángulo entre el panel solar y el vector del Sol, por lo que $\cos(\phi) = 1$ es el valor buscado. No se mantiene el objetivo de $\cos(\phi) = 1$ dado que el control puramente magnético está subactuado [8].

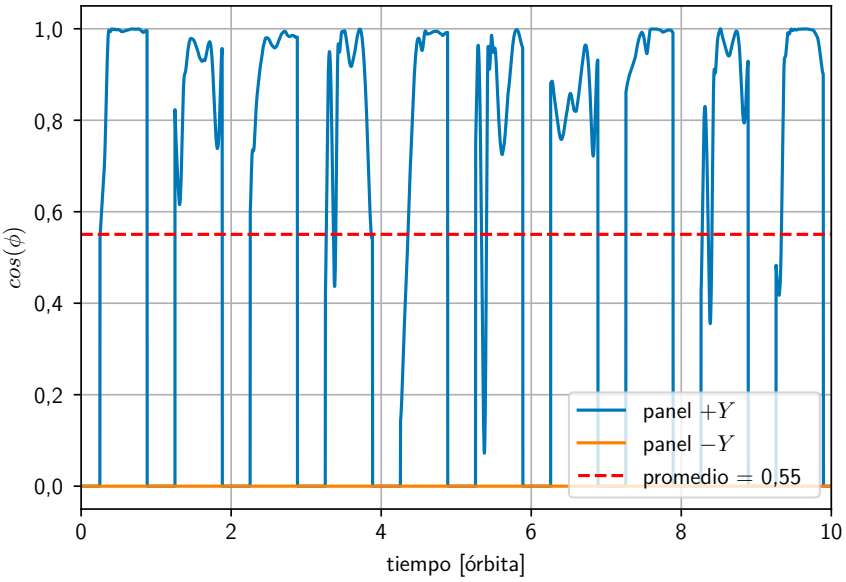


Figura 6: Apuntamiento solar durante 10 órbitas para el caso de una órbita con 38% de eclipse.

En la Fig. 7 se muestran los resultados de simulaciones utilizando el método Montecarlo variando parámetros de órbita. Se observa que el cos(ϕ) rondará en los 0,8 para órbitas sin eclipse y cercano a 0,6 para órbitas menos favorables.

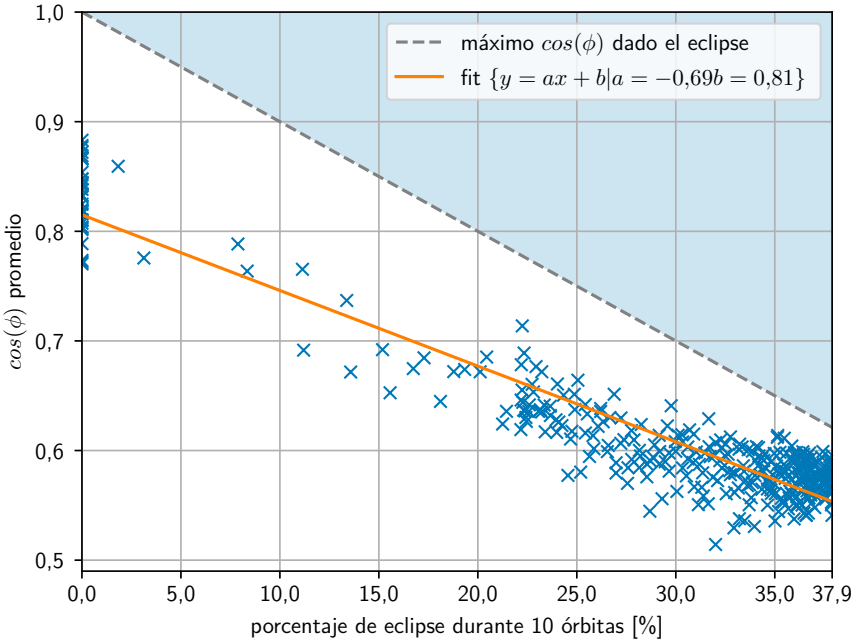


Figura 7: cos(ϕ) promedio en función del porcentaje de eclipse. Cada cruz representa una simulación donde se modificó el ángulo del nodo ascendente de la órbita aleatoriamente.

3 Conclusiones

En este trabajo se definieron las leyes de control para los 2 modos de funcionamiento del ADCS del USAT-I. Se compararon 2 leyes de control para el modo detumbado y dado los resultados de las simulaciones se optó por utilizar el algoritmo definido por (2) ya que tiene mejor rendimiento en estado estacionario.

Se propuso una ley de control para realizar el apuntamiento solar, se verificó mediante simulaciones y se observó un rendimiento razonable. Los resultados muestran que el cos(ϕ) no alcanza a mantener el valor 1 buscado (ver Fig. 5). Esto era previsible dado que el USAT-I está funcionando con actuación puramente magnética, que es un tipo de actuación subactuado y no es capaz de controlar los 3 ejes de rotación en un mismo instante [8]. En un futuro trabajo esto se puede mejorar incluyendo a la rueda de inercia en el control.

4 Bibliografía

[1] S A Botta et al. “USAT I - Avances en el Primer Satélite de la UNLP”. En: VI Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 6). Haedo, nov. de 2021. ISBN: 978-987-88-4916-4. URL: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/159531.

[2] Vega Leañez, UIDET SENyT y Departamento de Electrotecnia. “DISEÑO PRELIMINAR DE LA OBC Y EL ADCS PARA EL SATELITE UNIVERSITARIO USAT”. En: I Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza (ITEE). La Plata, sep. de 2021. ISBN: 978-950-34-2049-2. URL: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/127860.

[3] S. Rodríguez et al. “Design of a Dual-Antenna and Dual-Band GPS Receiver for CubeSats”. En: *2017 IEEE URUCON*. 2017 IEEE URUCON. Oct. de 2017, págs. 1-4. DOI: 10.1109/URUCON.2017.8171862.

[4] Alicia Johnstone. *CubeSat Design Specification Rev. 14.1*. Ver. 14.1. 2022. URL: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf (visitado 10-03-2025).

[5] Eric Stoneking. “42: An Open-Source Simulation Tool for Study and Design of Spacecraft Attitude Control Systems”. 2 de feb. de 2018. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/20180000954 (visitado 27-10-2022).

[6] *42: A Comprehensive General-Purpose Simulation of Attitude and Trajectory Dynamics and Control of Multiple Spacecraft Composed of Multiple Rigid or Flexible Bodies(GSC-16720-1) | NASA Software Catalog*. URL: https://software.nasa.gov/software/GSC-16720-1 (visitado 10-03-2025).

[7] Giulio Avanzini y Fabrizio Giulietti. “Magnetic Detumbling of a Rigid Spacecraft”. En: *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 35.4 (jul. de 2012), págs. 1326-1334. ISSN: 0731-5090, 1533-3884. DOI: 10.2514/1.53074. URL: https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.53074 (visitado 27-05-2021).

[8] M. Lovera y A. Astolfi. “Spacecraft Attitude Control Using Magnetic Actuators”. En: *Automatica* 40.8 (1 de ago. de 2004), págs. 1405-1414. ISSN: 0005-1098. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.02.022. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109804000767 (visitado 15-04-2019).

ESTIMACIÓN DEL *FORE-AFT* DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE REDES NEURONALES RECURRENTES*

Saavedra, Marcos D.; Ibáñez, Bernabé; Inthamoussou, Fernando A.; Garelli, Fabricio

Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 1900.
e-mail: saavedramarcosdavid@ing.unlp.edu.ar

I. Introducción

Los esfuerzos globales por incrementar la generación de energía renovable, en respuesta al cambio climático asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero, han ido en aumento. Dentro de la generación renovable, la energía eólica es la más desarrollada de su tipo con una potencia instalada global de 934 GW [1]. Específicamente en Argentina, las renovables han cubierto un 13,9% de la generación durante 2022, alcanzando picos mensuales del 18% [2]. En particular, la evolución de la energía eólica se ha caracterizado por un notable aumento en el tamaño de los aerogeneradores, lo que generó la necesidad de emplear materiales cada vez más ligeros y, en consecuencia, estructuras más flexibles. Como resultado de este crecimiento, al objetivo clásico de maximizar la producción de energía se le ha añadido el de reducir las cargas mecánicas presentes en los aerogeneradores. Esto no solo prolonga su vida útil, sino que también reduce el costo de la energía generada. Por lo que resulta de suma importancia contar con medidas y/o estimaciones confiables de dichas cargas mecánicas para llevar a cabo análisis detallados de cargas, el monitoreo durante el funcionamiento y el diseño de controladores eficaces [3], [4].

Los métodos convencionales de estimación, como los observadores de Luenberger o los filtros de Kalman extendidos, han sido tradicionalmente empleados en la estimación de variables en sistemas dinámicos complejos. Estas técnicas de estimación clásica han sido estudiadas exhaustivamente en aerogeneradores. Por ejemplo, para la estimación de la velocidad del viento, estados dinámicos de la torre e identificación de parámetros inciertos o cargas de fatiga [5]. Sin embargo, estos métodos clásicos dependen de modelos matemáticos de alta fidelidad que pueden ser difíciles de obtener cuando la dinámica del sistema es intrínsecamente no lineal y altamente compleja.

En contraste, el enfoque basado en datos permite aprender dicha dinámica directamente a partir de los datos operacionales, sin necesidad de un modelado analítico detallado. Se ha demostrado que es posible emplear alternativas basadas en datos para la estimación de cargas mecánicas de fatiga en aerogeneradores, por ejemplo, a partir de *Redes Neuronales Feedforward* [6] y métodos basados en *Support Vector Regression* [7]. Aunque, muchas de ellas dependen puramente de datos actuales, sin considerar comportamientos temporales pasados. Para abordar esta limitación, se han desarrollado enfoques más sofisticados, como aquellos basados en Redes Neuronales Recurrentes (RNN), que permiten capturar dependencias temporales en los datos. Un ejemplo representativo se presenta en [8], donde se emplea un tipo especial de RNN llamado Red Neuronal de Memoria a Corto y Largo Plazo (LSTM) para la estimación de la velocidad del viento en un aerogenerador.

Este trabajo presenta un estimador basado en una RNN para reconstruir el desplazamiento *fore-aft* en la torre de un aerogenerador, utilizando un conjunto reducido de señales de entrada fácilmente medibles. La selección de estas señales se fundamenta en un análisis de correlación respecto de la variable objetivo. Además, se demuestra que la RNN propuesta ofrece buenas estimaciones en las distintas regiones de operación sin requerir

* Trabajo presentado previamente en la XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2023.

sensores adicionales a los comúnmente presentes en el lazo de control del aerogenerador. Los datos de entrenamiento fueron generados mediante un simulador de alta fidelidad ampliamente aceptado y certificado [9].

II. Sistema bajo estudio

El sistema analizado en este trabajo corresponde al aerogenerador de referencia de 5MW desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [10]. Este modelo de referencia provee una representación realista de un aerogenerador de gran tamaño de tres palas con eje horizontal. Su operación es regulada por el controlador de referencia cuyos detalles se encuentran definidos en [11], el cual incluye un controlador de par que emplea una *look-up-table* o tabla de búsqueda (LUT), un controlador proporcional-integral (PI) de ganancia tabulada y su respectiva estrategia *anti-windup* para el control de *pitch*, mientras que la referencia de yaw se mantiene constante.

La operación del aerogenerador usualmente se divide en tres regiones definidas por la velocidad del viento. En cada una de ellas, los objetivos de control son distintos, lo que conlleva diferentes comportamientos de los controladores de par y de *pitch*. Para bajas velocidades de viento (Región 1), el *pitch* se fija en un ángulo óptimo, mientras que el control de par sigue la curva de máxima potencia. A altas velocidades de viento (Región 3), el control de *pitch* regula la velocidad de rotación en su valor nominal, con el par constante también en su valor nominal. En la región de transición (Región 2) interactúan ambos controladores, resultando la más crítica debido a que suele producir los mayores esfuerzos y transitorios.

La variable a estimar es el desplazamiento *fore-aft* (adelante-atrás) en la góndola del aerogenerador, la cual es generada por las fuerzas aerodinámicas no estacionarias sobre el rotor, que inducen vibraciones longitudinales en la torre. Debido a la naturaleza turbulenta del viento, estas fuerzas varían constantemente en magnitud y dirección [12]. Además, si la frecuencia de las cargas aerodinámicas se acerca a la frecuencia natural de la estructura en la misma dirección, se puede inducir resonancia que amplifica el desplazamiento *fore-aft*. Esta oscilación tiene un impacto directo en las cargas de fatiga y extremas del sistema, por lo que su estimación resulta relevante tanto para el control activo de oscilaciones como para el monitoreo estructural del aerogenerador.

III. Estimación mediante Redes Neuronales

En esta sección se describen los principios detrás del estimador propuesto, la generación de los datos utilizados para sintonizarlo y el esquema de entrenamiento seguido.

III-a. Redes Neuronales Recurrentes

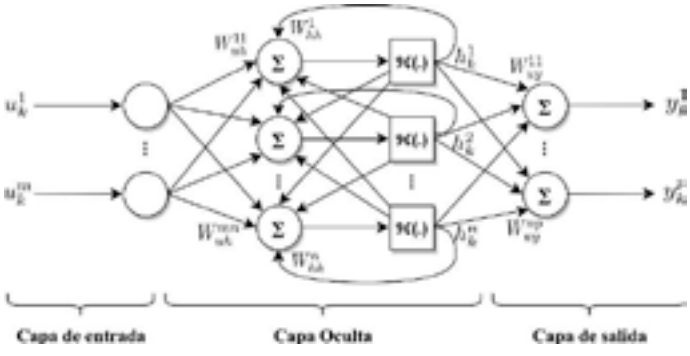


Figura 1. Diagrama esquemático de una RNN.

Dado el comportamiento dinámico no lineal complejo presente en el sistema bajo estudio, se ha optado por emplear una RNN como estimador. Las RNN son un tipo de Red Neuronal Artificial capaces de modelar relaciones secuenciales entre los datos. A diferencia de las redes *feedforward* convencionales, las RNN incorporan conexiones recurrentes en su capa oculta, permitiéndoles mantener un estado interno en cada neurona a lo largo del tiempo, tal como se ilustra en la Figura 1. Este estado funciona como una especie de memoria dinámica que puede capturar información relevante de pasos de tiempo previos, y no sólo del instante actual. De esta forma, se puede pensar a

las neuronas de la capa oculta de una RNN como estados en un modelo de Espacio de Estados No Lineal, cuya dinámica está determinada por [13]:

$$h_k = \sigma(W_{uh}u_k + W_{hh}h_{k-1} + b_h), \qquad y_k = W_{hy}h_k + b_y, \qquad (1)$$

donde h_k, u_k e y_k denotan el vector de estados ocultos, la entrada y la salida en el instante k respectivamente, W_{uh}, W_{hh} y W_{hy} son matrices de pesos, b_h y b_y son términos de sesgo y σ es una función de activación no lineal.

Cabe aclarar que, si bien el entrenamiento de las RNN puede resultar complejo debido a sus dinámicas no lineales, una vez que el modelo es adecuadamente ajustado y optimizado, la inferencia para nuevos datos no demanda un alto costo computacional ni de memoria.

III-b. Selección de las variables de entrada

Se realizó un análisis estratégico de las posibles variables de entrada, seleccionando cuidadosamente aquellas que pueden proporcionar información relevante. Se priorizaron las señales comúnmente disponibles para el control del aerogenerador, dado que son en su mayoría fácilmente medibles, evitando así la necesidad del uso de sensores adicionales.

A partir de la disponibilidad de estas señales, se identificaron las variables que demostraron una correlación significativa con el desplazamiento *fore-aft*. Este proceso involucró un análisis de correlación de Spearman, el cual es adecuado para datos con relaciones no lineales, a diferencia del uso de coeficientes de correlación de Pearson, que asumen normalidad en la distribución de las variables utilizadas. Se examinaron las matrices de coeficientes de correlación de Spearman para las tres regiones de operación del aerogenerador, lo que permitió comprender cómo las variables de entrada se relacionan entre sí y con el desplazamiento *fore-aft* en cada región.

Finalmente, se seleccionaron cinco variables de entrada que contienen información relevante sobre la respuesta ante las condiciones aerodinámicas y estructurales del aerogenerador, incluyendo variables provenientes del sistema de control, como lo son el par eléctrico (*GenTq*) y velocidad angular del generador (*GenSpeed*), el ángulo de paso de las palas (*BldPitch*) mediciones del anemómetro de la velocidad del viento en la dirección frontal (*WindVxi*) y la aceleración absoluta en la torre, orientación longitudinal (*YawBrTAxp*).

La Figura 2 muestra los índices de correlación que reflejan las relaciones y tendencias observadas frente a la variable objetivo (*TTDspFA*). Cabe destacar que el análisis de correlación no implica causalidad. Cuando dos variables están correlacionadas, simplemente significa que existe la tendencia estadística de cambiar conjuntamente. Una correlación positiva entre dos variables indica que tienden a aumentar o disminuir al mismo tiempo, mientras que una correlación negativa sugiere que cuando una variable aumenta, la otra tiende a disminuir, y viceversa. Sin embargo, esta perspectiva proporciona una indicación inicial de la importancia de cada característica al establecer relaciones con la señal a estimar.



Figura 2. Coeficientes de correlación de Spearman con respecto al desplazamiento *fore-aft* para las tres regiones de operación del aerogenerador.

Se puede observar que en la Región 1 existe una correlación fuerte (de -0,74) entre la variable de aceleración en la góndola (*YawBrTAxp*) y el *fore-aft*, demostrando que dicha señal aporta información relevante sobre la oscilación en estudio. Luego se presentan correlaciones moderadas con las demás variables, a excepción del *pitch*, que en esta región se encuentra

inactivo. En la Región 2, para las variables relacionadas al generador y al viento las correlaciones son en general fuertes, con coeficientes altos (mayores a 0,70). Mientras que para las variables de *pitch* y la aceleración *YawBrTAxp* se observa una correlación débil. Finalmente, en la Región 3, la inactividad del control de par resulta en una baja correlación de las variables relacionadas. A diferencia del *pitch*, que tiene el coeficiente más significativo, seguido de la aceleración *YawBrTAxp* y la velocidad del viento.

III-c. Generación de datos y esquema de entrenamiento

Los datos utilizados fueron generados mediante el software Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence (FAST) desarrollado por NREL [9]. FAST permite realizar simulaciones dinámicas, resolviendo las ecuaciones complejas de movimiento acoplado entre aerodinámica, elasticidad, controles y turbulencia. Se trata de un software de alta fidelidad certificado y ampliamente aceptado para la simulación de aerogeneradores.

La generación de vientos realistas utilizados por el simulador se realizó empleando el software TurbSim [14], el cual se configuró para generar una clase de turbulencia B. El conjunto de datos de entrenamiento se obtuvo a partir de 6 simulaciones, cada una de 10 minutos de duración. Estas simulaciones comprendieron dos semillas diferentes con la misma media de viento para cada región de operación del aerogenerador, con velocidades medias de 6 m/s, 11 m/s y 16 m/s. Por su parte, el conjunto de validación se generó con 3 simulaciones adicionales de 10 minutos por región no usadas en el entrenamiento, con medias de velocidad de 7 m/s, 12 m/s y 17 m/s. De este modo, el esquema de entrenamiento y validación abarca múltiples condiciones operativas, permitiendo que la red neuronal aprenda las relaciones dinámicas independientemente del régimen de funcionamiento y evaluando su capacidad para estimar el *fore-aft* en las distintas regiones de operación, incluso en presencia de datos completamente nuevos representativos de cada región.

Además, con el objetivo de facilitar el entrenamiento de la red neuronal, los datos de las variables de entrada fueron normalizados utilizando el método *min-max* para escalar los datos entre 0 y 1. De esta forma, se evitan problemas numéricos asociados a explosiones o desvanecimientos del gradiente durante el entrenamiento del modelo, mejorando la convergencia del proceso de optimización de los pesos sinápticos de la red.

III-d. Modelo del estimador

El modelo de RNN para la estimación del desplazamiento *fore-aft* se implementó utilizando el *toolbox* de Deep Learning de Matlab®. Este conjunto de herramientas proporciona funciones y arquitecturas diseñadas para el desarrollo de redes neuronales profundas. Particularmente, se utilizó la función *layrecnet* para construir una RNN completamente conectada con una capa recurrente oculta que emplea funciones de activación tangente hiperbólica (TanH). En este caso, para estimar con una exactitud aceptable el comportamiento del *fore-aft,* fueron necesarias 8 neuronas ocultas y se consideraron las últimas 4 muestras temporales para retroalimentar el estado oculto.

Para entrenar la RNN, se empleó el algoritmo de retropropagación a través del tiempo. El método calcula los gradientes de la función de pérdida a lo largo de los pasos de tiempo elegidos, con el propósito de optimizar los pesos sinápticos. El objetivo de esta optimización es minimizar el Error Cuadrático Medio (MSE) utilizado como funcional de costo.

El modelo resultante constituye un estimador dinámico no lineal que, en cada instante de tiempo, estima el desplazamiento *fore-aft* a partir de las variables de entrada mencionadas en la Sección III-b.

IV. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del desempeño alcanzado por el estimador basado en RNN propuesto para la reconstrucción del desplazamiento *fore-aft*. Se analizan las

estimaciones generadas a partir de los datos de validación para evaluar la calidad de la generalización del modelo.

En la Figura 3a se presenta una comparación de la estimación correspondiente a la región de baja velocidad de viento (7 m/s). Se puede observar la señal *fore-aft* obtenida mediante simulación (en azul) con la estimación realizada por la RNN (en naranja). De manera similar, en las Figuras 3b y 3c se exponen los resultados para las regiones de velocidad media (12 m/s) y alta (17 m/s) de viento, respectivamente. Cabe aclarar que, si bien en dichas figuras se muestran solo 100 segundos para cada región de operación a fin de mejorar la comparación visual, el análisis de desempeño del estimador efectivamente consideró la totalidad de los datos de validación de 10 minutos por región.

Además, la Tabla 1 resume las métricas de desempeño obtenidas por el estimador en cada región: MSE, Error Absoluto Medio (MAE), Error porcentual absoluto medio (MAPE) y Coeficiente de Determinación (R^2).

Como se puede observar, los resultados del estimador propuesto son satisfactorios para las tres regiones de operación. Tanto los valores del MSE como del MAE son reducidos, lo que indica que las diferencias entre las predicciones y los valores reales son mínimas. La métrica MAPE también es baja en todas las regiones, señalando un error porcentual mínimo en relación a los valores reales medidos (entre un 5,2% y un 7,7%). Por otro lado, el coeficiente de determinación R^2 alcanza valores cercanos a 1, indicando que se logra explicar de manera adecuada la variabilidad de la señal objetivo.

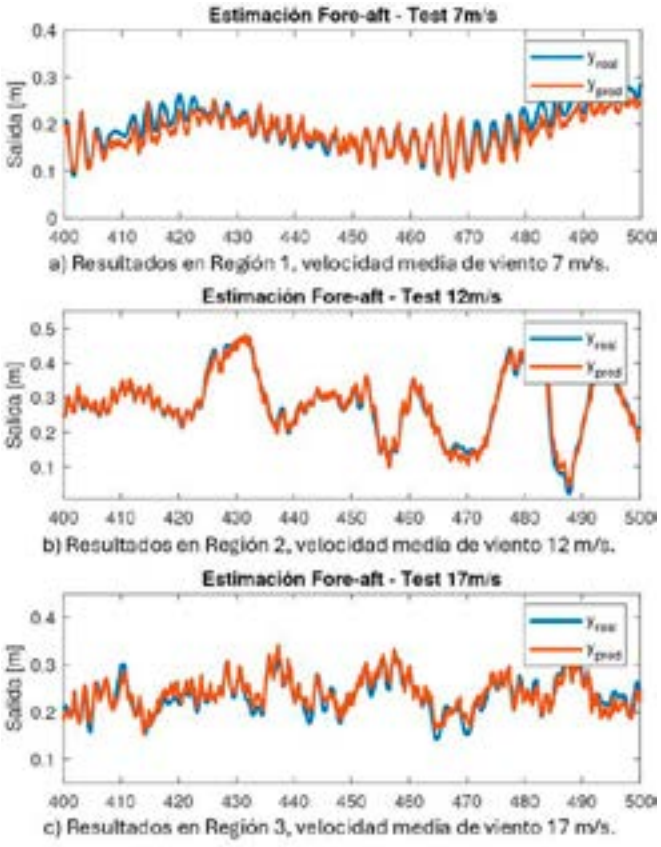


Figura 3. Visualización de la estimación *fore-aft* de la RNN para cada región.

Tabla 1. Métricas de evaluación del modelo en las tres regiones de operación.

Métrica	**Regiones**		
	Región 1 (7 m/s)	Región 2 (12 m/s)	Región 3 (17 m/s)
MSE	0,00030	0,00027	0,00028
MAE	0,01328	0,01213	0,01310
MAPE	7,69500	5,18305	5,90142
$\boldsymbol{R^2}$	0,83211	0,96428	0,81115

Se destaca un mejor comportamiento para la Región 2, seguido de la Región 3, debido a que el estimador cuenta con una mayor información en la entrada. En el primer caso, se encuentran activos los controladores de *pitch* y de par reflejándose esta información en las entradas asociadas. Mientras que para la Región 3, solo el controlador de *pitch* está activo. Por último, se puede señalar que en la Región 1, la RNN dispone de una menor cantidad de información disponible al estar el *pitch* inactivo y existir una relación de dependencia entre la velocidad de rotación y el par del generador.

V. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un estimador del desplazamiento *fore-aft* en aerogeneradores basado en Redes Neuronales Recurrentes. La metodología propuesta

aprovecha la capacidad de las RNN para modelar relaciones temporales complejas entre variables, lo cual resulta idóneo para estimar el comportamiento dinámico del *fore-aft*.

A diferencia de los estimadores analíticos tradicionales, la solución basada en RNN evita la necesidad de modelos matemáticos altamente detallados, aprendiendo directamente la dinámica del sistema a partir de los datos operacionales. Además, el análisis de correlación de Spearman permitió seleccionar cuidadosamente las variables de entrada más relevantes para el entrenamiento de los estimadores RNN. Esto posibilitó identificar señales altamente informativas y sencillas de medir, lo que podría facilitar la implementación en aplicaciones reales. Por otro lado, los resultados alcanzados demuestran la efectividad del estimador para reconstruir la oscilación *fore-aft* en todo el rango de operación del aerogenerador.

Como trabajos futuros, podría explorarse la posibilidad de extender el enfoque a la estimación del movimiento lateral de la torre y posteriormente, a las deflexiones de las palas. Dicha ampliación contribuiría a lograr una estimación más completa de las cargas aerodinámicas del aerogenerador.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por Universidad Nacional de La Plata (UNLP) (Proyecto I258/I253) y CONICET (PIP112-202001-00331/02595).

Referencias

[1] WWEA Annual Report 2022 [En línea]. (2022). Disponible en: https://wwindea.org/wp-content/uploads/2023/03/WWEA_WPR2022.pdf

[2] Cammesa Informe Anual 2022 [En línea]. (2022). Disponible en: https://cammesaweb.cammesa.com/?wpdmdl=45057

[3] Yuan, Y., Chen, X., & Tang, J. (2020). Multivariable robust blade pitch control design to reject periodic loads on wind turbines. Renewable Energy, 146, 329–341.

[4] Ibáñez, B., Inthamoussou, F. A., & De Battista, H. (2020). Wind turbine load analysis of a full range LPV controller. Renewable Energy, 145, 2741–2753.

[5] Ritter, B., Schild, A., Feldt, M., & Konigorski, U. (2016). The design of nonlinear observers for wind turbine dynamic state and parameter estimation. Journal of Physics: Conference Series, 753(5), 052029.

[6] de N Santos, F., D'Antuono, P., Robbelein, K., Noppe, N., Weijtjens, W., & Devriendt, C. (2023). Long-term fatigue estimation on offshore wind turbines interface loads through loss function physics-guided learning of neural networks. Renewable Energy, 205, 461–474.

[7] He, R., Yang, H., Sun, S., Lu, L., Sun, H., & Gao, X. (2022). A machine learning-based fatigue loads and power prediction method for wind turbines under yaw control. Applied Energy, 326, 120013.

[8] Chen, P., & Han, D. (2022). Effective wind speed estimation study of the wind turbine based on deep learning. Energy, 247, 123491.

[9] Jonkman, Jason Mark, Buhl, M. L., & Others. (2005). FAST user's guide (Vol. 365). National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, USA.

[10] Jonkman, Jason, Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

[11] Hansen, Morten H., Hansen, A. D., Larsen, T. J., Øye, S., Sørensen, P. E., & Fuglsang, P. (2005). Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine.

[12] Hansen, M. H. (2007). Aeroelastic instability problems for wind turbines. Wind Energy, 10(6), 551–577.

[13] Ogunmolu, O. P., Gu, X., Jiang, S. B., & Gans, N. R. (2016). Nonlinear Systems Identification Using Deep Dynamic Neural Networks. CoRR, abs/1610.01439.

[14] Jonkman, B. (2016). Turbsim. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Tech. Rep.

GPSDO, OSCILADOR DISCIPLINADO POR GPS

Lorente, Hugo; Sager, Gerardo.E; Juárez, José. M

Grupo de Investigación y Desarrollo en Comunicaciones Digitales – GrIDComD
Departamento de Electrotecnia – Facultad de Ingeniería UNLP – Calle 48 y 116 2do piso.

ger@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Este trabajo describe el diseño y construcción de un oscilador disciplinado por GPS, entendiendo por "disciplinado" que la frecuencia y la fase del oscilador están controladas por la señal de referencia de 1 pulso por segundo (PPS) proveniente de un receptor GPS. Esta señal tiene una precisión extremadamente alta a largo plazo, y aún en receptores de bajo costo suele tener una variación residual o jitter menor que 50 ns pico a pico.

En un trabajo anterior [1] se implementó un oscilador similar, pero en ese momento las señales de GPS incluían distorsiones intencionales por razones de seguridad militar que degradaban su utilidad como referencia de tiempo, asimismo, la sensibilidad de los osciladores a la temperatura y el costo elevado de osciladores estables controlados en horno (oven controlled crystal oscillators – OCXO) llevó a un límite en la precisión que podía obtenerse.

En la actualidad si bien el costo de los OCXO sigue siendo un tanto elevado, es posible conseguirlos a partir de equipos recuperados ya que se popularizó su uso en radiobases de telefonía celular.

El sistema consiste básicamente en un PLL que toma como referencia la señal de un PPS proveniente del receptor GPS, y produce una salida proveniente del OCXO que trabaja a 10 MHz y es convenientemente dividida en frecuencia. Esta salida, debería tener un jitter mucho menor que la referencia de entrada debido a que las constantes del PLL fueron calculadas para filtrar el ruido de fase. Asimismo, la estabilidad de frecuencia debería ser acorde con la estabilidad de frecuencia del sistema GPS.

Parte experimental

El esquema básico del GPSDO se muestra en la fig. 1 y se construyó alrededor del OCXO (oscilador a cristal controlado por horno) Vectron CO-705SB19V [2]. En este oscilador a cristal la frecuencia es estabilizada por un horno que mantiene su temperatura constante y dispone de un ajuste grueso a tornillo y una entrada de voltaje para variar la frecuencia (V_C). Al variar el voltaje de control entre 0 y 5V la frecuencia del oscilador varía alrededor de 1PPM. A partir de ahora, por simplicidad, nos referiremos a este oscilador como VCO.

La frecuencia del VCO se sincroniza con el pulso por segundo (PPS) proveniente del receptor GPS comparando la fase de la señal de referencia con la fase del VCO. Si se divide la frecuencia nominal de salida del VCO (10 MHz) por 10^7 para obtener una frecuencia de 1 Hz, el lazo de control tratará de reducir la diferencia de fase a cero (o a una constante) y en estas condiciones:

$$\theta_i = \theta_O + Cte \qquad (1)$$

Como

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta}{dt}$$

$$f_R = PPS = \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta_i}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{d\theta_i}{dt} = 2\pi f_R$$

$$\frac{f_0}{N} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta_O}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{d\theta_O}{dt} = \frac{2\pi f_0}{N}$$

Además, como la derivada respecto al tiempo de una constante es nula, si derivamos respecto al tiempo la Ec. (1) se puede obtener que $f_0 = N f_R$ y resulta que la frecuencia de nuestro oscilador quedará sincronizada con la frecuencia de los patrones que rigen el sistema GPS.

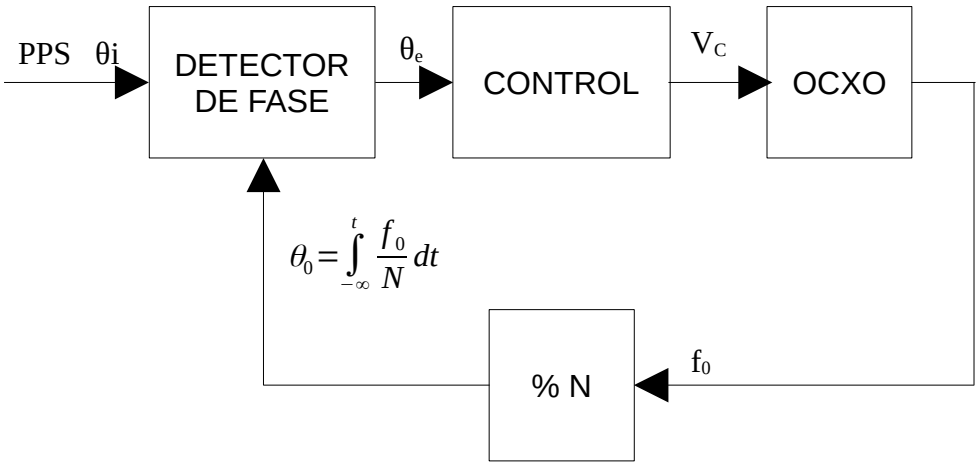


Figura 1: Esquema general del GPSDO

La implementación se realizó de forma híbrida utilizando un detector de fase y un filtro de lazo digitales y un VCO analógico, aprovechando un conversor D/A basado en PWM para obtener la tensión de control V_C del VCO. En la fig. 2 se muestra un esquema de la implementación del sistema [3].

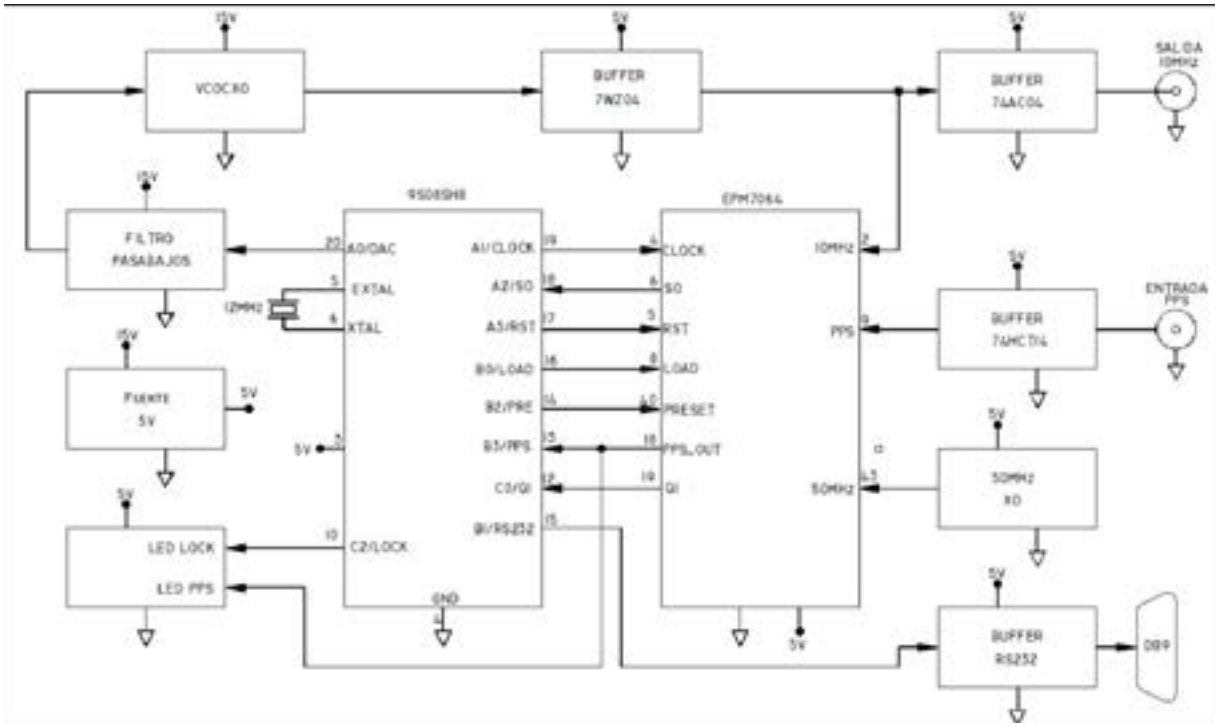


Figura 2: Esquema Detallado de GPSDO

La FPGA EPM7064 recibe las señales del VCO, del pulso por segundo (PPS) y de un oscilador auxiliar de 50MHz y mide la fase entre la señal de 10MHz y el PPS.

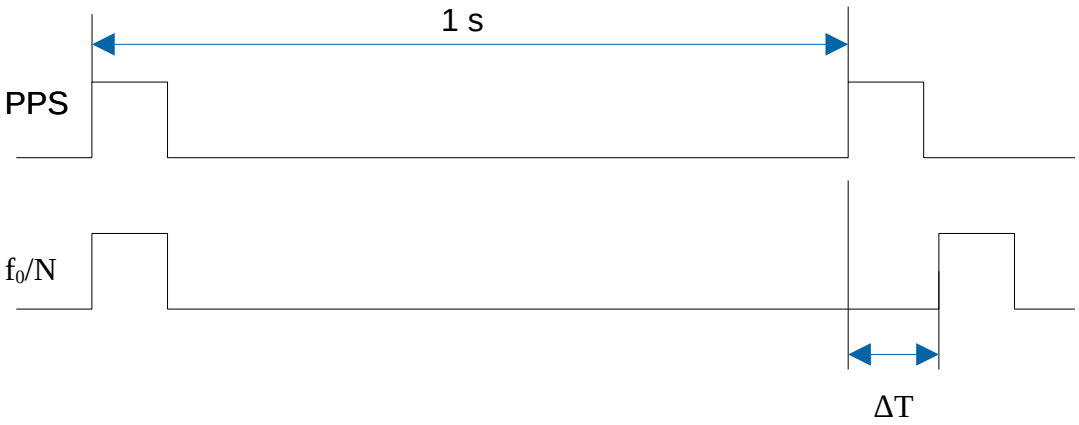


Figura 3: Señales a la entrada del detector de fase

La diferencia de fase es leída por el microcontrolador 9S08SH8 en el cual se implementa el filtrado digital que genera el número de control. Este número se usa para controlar el factor de trabajo del PWM del controlador que luego de ser filtrada por el filtro pasabajos proporciona la tensión de control para el VCO.

Los separadores o buffers permiten acomodar las señales según sea necesario. El separador 7WZ04 convierte la salida sinusoidal del VCO en una onda cuadrada adecuada para ingresar a la FPGA y asimismo es transferida al separador 74AC04 que esta conectado en una configuración que proporciona una impedancia de salida de 50] para que pueda ser transmitida por un cable coaxial. Finalmente el separador 74HCT14 tiene una entrada del tipo disparador de Schmitt con impedancia de entrada de 50Ω que recibe el PPS desde un receptor GPS remoto.

El bloque RS232 permite que algunas de las variables generadas por el microcontrolador puedan ser leídas por una computadora para diagnóstico y control del funcionamiento del oscilador disciplinado. El bloque marcado LEDs contiene indicadores luminosos del PPS y de la condición de enganche del PLL. A esto se suma una fuente estabilizada de 5V y un oscilador a cristal de 50MHz.

Es interesante analizar la implementación del detector de fase, en la fig. 3 se muestran la señal de 1Hz o sea 1 PPS proveniente del receptor GPS y la señal proveniente del VCO, previamente dividida por N, siendo N en este caso igual al valor de la frecuencia nominal del oscilador f_{nom} ambas señales se muestran alineadas en un flanco de subida.

Como la señal del VCO tiene una frecuencia real $f_0 = f_{nom} + \Delta f$ el siguiente flanco se produce un instante ΔT después que el flanco del PPS.

Puede demostrarse, a partir de las relaciones integrales entre frecuencia y fase, y considerando que la frecuencia instantánea del VCO no cambia durante el intervalo de medición, que ΔT es proporcional al error de fase, y puede medirse con un circuito como el de la fig. 4.

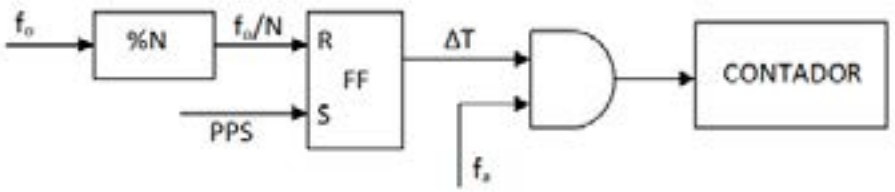


Figura 4: Detector de fase

En efecto, el flanco positivo del PPS activa la salida del FF y habilita que se cuenten los pulsos provenientes de un generador auxiliar cuya frecuencia suele elegirse varias veces mayor a Cuando llega el flanco positivo de se detiene la cuenta. En el

contador, queda almacenado el número de ciclos del generador auxiliar con período T_a contados durante el intervalo ΔT.

Si bien esta implementación parece simple, tiene sus limitaciones en cuanto a la complejidad del hardware necesario: $\%N$ necesita un contador hasta 10^7, para implementarlo hacen falta al menos 24 biestables. el contador debería poder contar al menos hasta f_a y si ésta es por ejemplo 5 veces superior a f_0. eso implica 26 biestables, además de posiblemente otros tantos para almacenar los valores para procesarlos mientras se sigue contando. Para disminuir la complejidad, se puede utilizar como divisor un número $M<N$ que cumpla con estar formado por factores de N, por ejemplo, si $N=10^7=2^7 5^7$ entonces N puede ser expresado en la forma $N=MP$, donde $M=2^m 5^n \; y \; P=2^{7-m}5^{7-n} \; con \; m,n=0,1...7.$

Esto puede interpretarse como que la frecuencia a la salida del divisor tendrá un valor P y que durante el período de 1 seg que abarca el PPS, habrá nominalmente P ciclos enteros de f_0/M y que ΔT podrá variar solamente durante el tiempo correspondiente a un período de esta frecuencia o sea $\Delta T_{MAX}/P$. Esto disminuye un poco el rango de variación de θ_e pero simplifica sustancialmente la complejidad del hardware. El valor de ΔT_{MAX} también resulta importante para el diseño del contador de los pulsos f_a que en definitiva son los que van a medir el error de fase. En efecto, la cantidad máxima de pulsos C_{MAX} resulta $C_{MAX}=\Delta T_{MAX} f_a = f_a/P$.

En el caso de este trabajo, se adopto un divisor $M=12500=2^2 5^5$ con esto la frecuencia a la salida del divisor es $P=2^5 5^2=800[HZ]$, $\Delta T_{MAX}=1{,}25\,mseg$ y $C_{MAX}=62500.$

Se implementó el lazo de control de manera tal que puede accederse a las variables controladas a través de un puerto RS232 no intrusivo, así puede seguirse el comportamiento desde una terminal externa. También se pueden inicializar externamente algunas variables de inicio para acelerar el enganche del lazo, e introducir perturbaciones (saltos de fase).

Resultados y discusión

Se hicieron distintas experiencias para caracterizar el sistema. En la fig. 5 se muestra como se comporta el número de fase al encender el GPSDO. Puede observarse que el transitorio de enganche ocupa alrededor de 4000 segundos, lo que sumado al tiempo de calentamiento del OCXO (15 minutos) lleva a alrededor de una hora y media el tiempo de puesta en marcha del sistema.

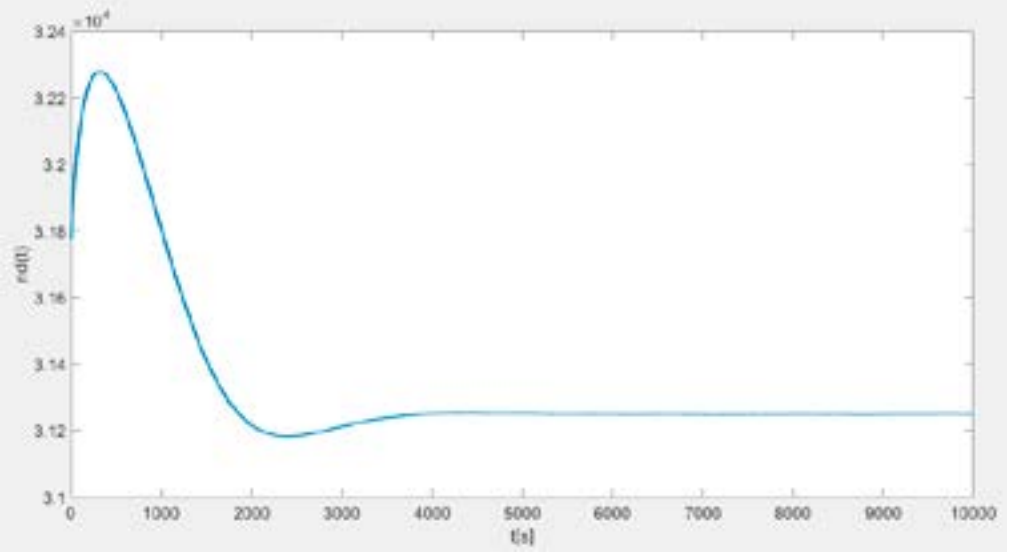


Figura 5: Transitorio de enganche al inicio

En la fig. 6 se muestra los valores del número de control n_c que actúa sobre el VCO a través del PWM y su filtro asociado.

En el diseño del filtro se tuvo cuidado que las armónicas generadas por el PWM no modularan al VCO y la señal que llegara a éste fuera lo más “limpia” posible. De todas maneras pueden apreciarse variaciones instantáneas y una tendencia lineal de las mismas. la tendencia lineal puede atribuirse a envejecimiento del oscilador y las variaciones muestra a muestra pueden deberse a inestabilidades del mismo oscilador y también a la acción de control tendiente a corregir las inestabilidades del PPS, recordando que puede tener un jitter de hasta 50ns pico a pico.

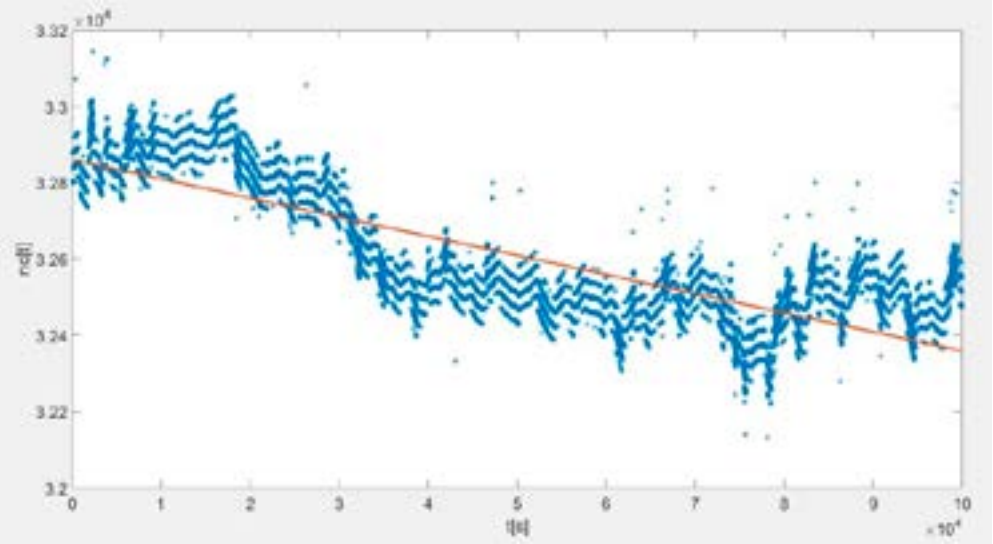


Figura 6: Número de control en el lazo enganchado 100.000 muestras

Para caracterizar estas inestabilidades se recurre a la varianza de Allan. Como podemos medir el número de control n_C y convertir este número en variaciones de frecuencia segundo a segundo, podemos calcular la desviación de Allan producida por las variaciones del número de control para un retardo de un segundo. Dado el número de control podemos calcular:

$$f_0(i)=\frac{K_{DA}K_o}{2\pi}n_C(i)=\frac{K_o^{'}}{2\pi}n_C(i) \quad (2)$$

El indice i indica la muestra tomada en el instante iT_s y la varianza de Allan se calcula como:

$$AVAR=\sigma_{f_0}^2(\tau)=\frac{1}{2(M-1)}\sum_{i=1}^{M-1}[y(i+1)-y(i)]^2 \quad (3)$$

donde $y=\frac{f_0}{f_{nom}}$ es la frecuencia fraccional. Reemplazando la Ec. 2 en Ec. 3 queda

$$AVAR=\sigma_{f_0}^2(\tau)=\frac{1}{2(M-1)}\left(\frac{K_o^{'}}{2\pi f_{nom}}\right)\sum_{i=1}^{M-1}[n_C(i+1)-n_C(i)]^2$$

y entonces

$$ADEV=\sigma_{f_0}=\sqrt{\sigma_{¿}^2(\tau)}$$

Se calculó ADEV sobre 260000 muestras y se obtuvo $ADEV = 3.2\,x\,10^{-11}$ que es compatible con los valores documentados en la literatura para osciladores a cristal [4].

Volviendo a la fig. 6, la linea roja da una tendencia a largo plazo de variación de frecuencia. en este caso equivale a un cambio $n_C = 273$ cuentas.

Recordando las relaciones entre n_C y Δf, podemos obtener que

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{K_o'}{2\pi f_0}\frac{\Delta n_C(i)}{\Delta t}$$

En este caso se obtuvo un valor que resultó $\Delta f_0/f_0 = 3{,}6.10^{-10}$ compatible con la especificación del OCXO de $\Delta f_0/f_0 < 5.10^{-10}$.

Conclusiones

En este tipo de sistemas, las constantes de tiempo de los sistemas involucrados suelen ser bastante largas, con lo cual el trabajo experimental suele abarcar varios días o inclusive semanas. por ejemplo, el tiempo de enganche del PLL, incluyendo el tiempo de calentamiento del horno está en alrededor de dos horas, y para poder apreciar la estabilidad de frecuencia, es necesario realizar en el orden de 10^5 mediciones, a razón de una por segundo, con lo cual ya estamos en más de un día de experiencia.

Los resultados obtenidos estuvieron en línea con lo esperado, se han medido valores de desviación de Allan, que es un parámetro usual en este tipo de caracterizaciones, de alrededor de 3.2 10^{-11} que son compatibles con valores que se encuentran en la literatura. También se ha medido la deriva de frecuencia del OCXO $\Delta f_0/f_0 = 3.10^{-10}$ la que resultó compatible con la especificación de $\Delta f_0/f_0 < 5.10^{-10}$.

El contraste se ha realizado con un oscilador de rubidio, y actualmente se está elaborando una configuración para realizarlo con los patrones de cesio y máser de hidrógeno existentes en el Observatorio Geodésico Argentino Alemán.

Bibliografía

[1] G. Sager, H. Lorente y C. Muravchik "Sincronización de un oscilador a cristal mediante el sistema GPS" Anales del XVI Congreso Argentino de Control Automático, AADECA '98, Setiembre de 1998. pp. 374-379.

[2] Vectron CO- 705S OCXO Basic Series- 1MHz to 25MHz.

[3] Brooks Shera, “A GPS- Based Frequency Standard”, QST, pp 37-44, Julio 1998.

[4] Yuriy S. Shmaliy, Luis Arceo- Miquel, Jorge Munoz- Diaz, and Oscar Ibarra-Manzano, “Real-time Frequency Estimation of Local Oscillators Using GPS Timing Receivers”, 2007 IEEE Frequency Control Symposium, Suiza, 29 de Mayo al 1 de Junio de 2007.

PROYECTO INTEGRADOR: UNA EXPERIENCIA DE APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS (ABP)

Spinelli, Enrique, Paus, Pablo, García, Pablo , Ferrari, Flavio y Fernandez Corazza, Mariano

Cátedra de Proyecto Integrador Ing. Electrónica, Fac. de Ingeniería UNLP,
spinelli@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Proyecto Integrador Ing. Electrónica es una asignatura obligatoria de 96 horas que corresponde al último semestre de la carrera. El Plan de estudios implementado en el año 2018 exigió modificar sustancialmente la metodología de la enseñanza respecto de su predecesora Proyecto Final del plan 2002, en la cual el alumno solía demorar más de un año en desarrollar un proyecto y aprobar la materia. La asignatura actual es semestral y sostiene los mismos objetivos: que el alumno afiance y adquiera habilidades para concebir, diseñar e implementar proyectos de ingeniería integrando conocimientos adquiridos a lo largo de su carrera. Este objetivo general contiene otros subyacentes como desarrollar capacidades de trabajar en grupos, de pensar críticamente, de trabajar y aprender en forma autónoma y de transmitir ideas en forma oral y escrita. La metodología adoptada para conseguir estos objetivos es el *aprendizaje basado en proyectos* (ABP): a lo largo del curso los alumnos desarrollan un proyecto sobre un problema concreto de ingeniería. Esto permite desarrollar criterios, ya que se evalúan distintas soluciones de diseño y variables como el tiempo de ejecución, los costos, la disponibilidad de componentes en el mercado y la distribución de tareas en un equipo de trabajo. Además, brinda la oportunidad de ejercitar la redacción de informes técnicos, su exposición oral y la discusión de alternativas en forma grupal. Esta presentación pretende exponer la experiencia de la cátedra utilizando ABP de los últimos cursos, describir las distintas alternativas metodológicas ensayadas, los inconvenientes encontrados, aciertos, errores, resultados obtenidos y nuevas estrategias a implementar. Se presenta una estrategia metodológica en la que cada grupo, conformado por dos alumnos, se encarga de un subproyecto enmarcado dentro de un proyecto más general, lo que resultó en una interacción dinámica entre los distintos grupos muy valorada por los alumnos. En el año 2022 cursaron los 11 alumnos más avanzados del plan 2018 quienes acreditaron la asignatura y completaron su carrera en 5 años. En el año 2023, de 16 inscriptos aprobaron 14 mientras que en el año 2024 de los 14 inscriptos aprobaron 12. Se presentará también el desarrollo, en este período, de proyectos finales por alumnos del plan 2002.

2. Desarrollo

En el Aprendizaje Basado en Proyectos el rol tradicional del docente se modifica, transformándose en guía y facilitador del aprendizaje; y también el del estudiante, que se convierte en un constructor de conocimiento, diseñador innovador, comunicador y artífice de su propio aprendizaje [1]. Si bien el proyecto consiste en realizar un diseño de electrónica, su éxito es el aprendizaje y adquisición de competencias por parte del alumno. El docente debe facilitar este éxito sin protagonizarlo.

En el inicio del curso se presentan pautas generales de concepción y documentación de proyectos, y a partir de allí las actividades curriculares se soportan sobre la realización de proyectos de ingeniería electrónica. Los proyectos abordan problemas de ingeniería específicos, en los cuales se aplican conocimientos adquiridos por el alumno en las materias previas y también aquellos adquiridos en un proceso de *búsqueda bibliográfica actualizada*, que busca estimular sus capacidades de aprender y de *aprender a aprender*.

Las fases típicas de una estrategia de *aprendizaje basado en proyectos* se adaptaron a la realización de un proyecto de electrónica factible de ser completado durante un semestre. Las actividades, que no son necesariamente secuenciales, sino que pueden interrelacionarse y coexistir son: la elección y formulación de los proyectos, el desarrollo de estos proyectos y la evaluación de los alumnos.

2.1. Elección y formulación de los proyectos

En las distintas ediciones del curso se ensayaron estrategias metodológicas, especialmente en la asignación y desarrollo de los proyectos y en la definición de especificaciones, buscando motivar a los estudiantes en la búsqueda de soluciones superadoras y facilitar discusiones grupales que permitan afianzar sus habilidades de exposición y de trabajo en colaboración.

Elección de los proyectos

En el primer curso, los proyectos de cada grupo fueron elegidos a partir de una oferta preparada por la cátedra o propuestos por los alumnos. Esta estrategia resultó motivadora por el interés particular de cada grupo en su tema de trabajo, pero como los proyectos tenían poca vinculación entre ellos, no resultaron apropiados para establecer discusiones generales y para mantener el interés y estimular la participación en las exposiciones de avance de los distintos grupos. Luego de este resultado un tanto frustrante, se decidió gestionar un *proyecto general del curso*, que se secciona en subproyectos altamente interconectados realizados por grupos de dos alumnos, cada uno bajo la tutela de un docente de la cátedra. La fuerte interacción entre los subproyectos, producto del objetivo común de desarrollar el *proyecto general del curso*, resultó muy beneficioso para fomentar el trabajo en colaboración de los grupos y el análisis crítico entre pares de las soluciones propuestas.

El *proyecto general* es propuesto por la cátedra junto a un seccionamiento en subproyectos preliminar que es acordado o modificado por los alumnos, quienes eligen libremente entre los subproyectos. Un subproyecto puede ser ejecutado por varios grupos de trabajo adoptando distintas alternativas, siempre que queden cubiertos los subproyectos necesarios para ejecutar el proyecto general. En caso de ser necesario, se reformula el proyecto o los subproyectos redistribuyendo las tareas hasta conseguirlo.

Existe un *objetivo general* y *objetivos específicos* que corresponden a cada subproyecto, lo cual impacta favorablemente en la dinámica del curso estimulando el desempeño en equipos de trabajo, dado que los grupos deben interactuar entre sí para cumplir con el objetivo general, enriqueciendo las discusiones y favoreciendo la vinculación horizontal.

Formulación de los proyectos

En el primer dictado de la asignatura, la formulación de los proyectos se realizó en forma tradicional. Los alumnos, luego de analizar los problemas a resolver y de realizar una búsqueda bibliográfica intensiva, formularon sus proyectos, que incluyen especificaciones precisas para los circuitos a diseñar. Una vez establecidas estas especificaciones iniciaron el diseño y la implementación de las soluciones propuestas. Esta estructura, que es tan ordenada como rígida, establece claramente las tareas a realizar y el éxito del proyecto, que consiste en *verificar* que el circuito diseñado cumple las especificaciones. En el uso de esta metodología se advirtió que no es apropiada para problemas que requieren soluciones innovadoras, porque resulta difícil definir especificaciones precisas antes de ensayar una solución. Además, el proceso de formulación del proyecto demanda mucho tiempo, retrasando el inicio de las actividades de diseño y construcción de prototipos que son sustanciales para cumplir con los objetivos de la asignatura, que además debe desarrollarse en un semestre.

En el segundo curso se introdujo la idea de “proyecto cero” donde los alumnos realizan un proyecto simple, construyendo y probando un prototipo que se acerque al problema sin un

diseño ni una justificación detallada. Con esto se consiguió que comiencen, en forma temprana, a probar ideas en forma experimental al mismo tiempo que realizan la formulación del proyecto. Finalmente se resolvió el problema de definir las especificaciones integrando el "proyecto cero" a esta actividad utilizando la metodología de gestión de proyectos "design thinking" [3]. En este contexto el problema a resolver se aborda con una comunicación fluida entre el diseñador (alumno) y el cliente (la cátedra). El denominado proyecto cero es una primera aproximación a la solución para dialogar con un hipotético cliente e ir estableciendo los requerimientos a partir de esta interacción. A medida que se definen las especificaciones se avanza con el diseño del circuito. Para el diseño específico del circuito se utiliza una metodología basada en un ciclo [2] que se inicia en la propuesta de un circuito, la determinación de sus ecuaciones de diseño y la obtención de resultados de simulación para determinar su viabilidad. Aquellos circuitos que son verificados por simulación se implementan y verifican experimentalmente para, finalmente, ser validados en conjunto con el cliente.

Organización del curso

El Aprendizaje Basado en Proyectos requiere un uso flexible del tiempo y del espacio; variables que se van modificando a lo largo de las distintas fases de implementación del proyecto según las necesidades de cada momento. El curso se dicta en dos escenarios: aula y laboratorio. En el aula se realizan las discusiones de las soluciones propuestas, la coordinación entre los proyectos de los distintos grupos y se dictan seminarios sobre metodologías de diseño de circuitos electrónicos, formulación de proyectos y algunos temas específicos que los diseños requieran. Las actividades de laboratorio se realizan en las instalaciones del Área Técnica de Electrónica e Instrumental (ATEI), donde los alumnos disponen de instrumental y componentes para experimentar con los circuitos propuestos. En esta etapa, especialmente al inicio del curso, se busca que el alumno explore libremente distintas soluciones, incluyendo las incorrectas, para aprender del error y a diagnosticar problemas de funcionamiento.

2.2. Desarrollo de los proyectos

Una vez asignados los subproyectos habiendo acordado las tareas y las responsabilidades, cada grupo emprende el desarrollo de su proyecto. Un docente supervisa en forma directa este proceso buscando estimular el trabajo autónomo y la producción de distintas alternativas en la solución de problemas. Las actividades a realizar son: búsqueda bibliográfica, diseño y construcción de circuitos y presentación de resultados con su correspondiente análisis crítico.

Búsqueda bibliográfica

La primera actividad es la búsqueda de información sobre el problema a resolver y las distintas soluciones disponibles. Los alumnos no solo buscan en Internet y en la bibliografía de asignaturas previas, sino que también recurren a otras fuentes, como consultas personales a profesores y profesionales. Cada grupo presenta la información recopilada y un análisis crítico de la misma, dando lugar a discusiones con los integrantes de todos los grupos. El aprendizaje se produce -en algún momento- cuando consiguen convertir la información en conocimiento para crear algo nuevo.

Una vez analizado el problema a resolver cada grupo comienza un ciclo iterativo de búsqueda de soluciones y definición de especificaciones que inicia con el proyecto cero. En este proceso se va generando el proyecto a realizar, sus entregables, las especificaciones y un cronograma apropiado para ejecutarlo en el semestre. En las primeras etapas los entregables consisten en informes de avance y simulaciones, en las intermedias son principalmente prototipos funcionales, y el último entregable es el Informe Final del Proyecto. Las exigencias de generación de documentación se incrementan hacia el final del proyecto. Al inicio del proyecto no se demanda una documentación precisa ni exhaustiva porque la formulación está en proceso y se promueven exposiciones orales con discusión

de alternativas entre pares. A mediados del curso debe entregarse la formulación del proyecto y finalmente el Informe Final.

Diseño y construcción de circuitos
Los alumnos proponen distintas alternativas a la solución de los problemas de diseño de su proyecto. En primer lugar presentan un análisis crítico y una evaluación preliminar basada en simulaciones en computadora y, posteriormente, las alternativas seleccionadas son implementadas y verificadas experimentalmente en laboratorio. Las actividades de laboratorio son intensivas en el curso. Una vez planteadas y discutidas grupalmente las posibles soluciones, el alumno debe implementar aquellas que considere apropiadas, las cuales son verificadas, o eventualmente descartadas, para continuar con el proceso iterativo de diseño hasta arribar a una solución que pueda ser validada.

Se prevé un ciclo iterativo de diseño y verificación hasta conseguir un prototipo funcional que cumpla con las especificaciones, que se van definiendo en el proceso de diseño. Se trata de un ciclo de diseño de circuito dentro del ciclo de *design thinking* [3]. Es esperable -y positivo- que el primer diseño no sea satisfactorio, pues permite identificar sus debilidades y fortalezas, y dar oportunidades de mejora, contribuyendo al desarrollo de la capacidad de superación y de la constancia. En este proceso los alumnos son asistidos por los docentes guía que promueven la crítica constructiva entre los estudiantes.

Presentación o difusión
Esta actividad es fundamental para que el alumno ejercite habilidades de transmitir ideas en forma oral y escrita, se desarrolla en distintas instancias del curso y sobre distintas audiencias. En el inicio del curso, cada grupo debe exponer el problema de ingeniería a resolver, y en su transcurso presentan en forma oral y escrita los avances realizados. Estas exposiciones son de índole técnica, entre pares. Al finalizar el proyecto, los alumnos lo presentan a una audiencia general y externa, y deberán esmerarse para que el público pueda comprender el proyecto realizado, sus objetivos, motivaciones y los resultados obtenidos.

Una vez finalizado el proyecto, se incentiva a los alumnos a reflexionar sobre el trabajo en equipo, la calidad del producto final, los próximos pasos que podrían tomar, y las competencias adquiridas en el proceso. Durante el curso se motiva a los alumnos para ayudarlos en este análisis que es el cierre del curso, previo a la exposición pública final de los proyectos. Sus impresiones son volcadas voluntariamente en una encuesta de la cátedra.

2.3. Evaluación de los alumnos
El ABP permite que sean muchos los aspectos que se pueden evaluar, más allá del producto final obtenido. Se debe valorar el camino hacia el aprendizaje y no solo los resultados, por lo tanto se evalúan tanto el proceso de aprendizaje como el producto final [4]. Si bien, tanto el informe final como el prototipo funcional son importantes y representan la mayor parte de la calificación final, se da especial importancia al camino recorrido. En este sentido los ejes en la evaluación son la adquisición de conocimientos y el desarrollo de competencias, tanto específicas de proyecto y diseño como genéricas. Entre éstas se destacan la expresión oral y escrita, trabajo en equipo y socialización, y fundamentalmente el desarrollo de la capacidad de pensamiento crítico y de iniciativa propia. En la evaluación se tiene en cuenta el punto de partida de cada alumno en cuanto a los conocimientos previos y la incorporación de los nuevos. En definitiva, se pretende la superación de la “zona de confort” para explorar otros caminos y adquirir nuevas habilidades.

Distintas instancias de evaluación
Desde el inicio de la cursada, los alumnos tienen que exponer periódicamente los avances de cada etapa del proyecto y la propuesta para la siguiente etapa. En cada una de estas instancias se incentiva la participación de todos alumnos para aportar ideas, ampliar el

panorama de las alternativas exploradas y coordinar las interacciones de cada subproyecto con el proyecto proyecto. Al final de cada exposición los docentes dan una devolución a los alumnos. En esta instancia se evalúan distintos aspectos: organización de la presentación, claridad de la exposición, calidad y profundidad del tema desarrollado y los resultados obtenidos.

Además de las exposiciones periódicas se evalúan los entregables acordados en la formulación de cada proyecto: informes parciales, informe final, simulaciones y prototipos funcionales. El objetivo principal de la asignatura es el proyecto y diseño de electrónica y en este tema específico se evalúan distintos aspectos como son: el análisis de alternativas de diseño, la explicitación de los criterios de ingeniería en la toma de decisiones, el grado cumplimiento de objetivos y cronograma.

¿Qué se puede mejorar?
En la experiencia de los últimos años se encontraron dificultades al establecer calificaciones en las instancias intermedias de evaluación. Lo que sería el equivalente de los parciales en otras asignaturas. Si bien se realizan estas evaluaciones por parte de los docentes, no hay una calificación formal como en un parcial tradicional. Este sería un punto a trabajar y mejorar en futuros cursos.

En este camino de mejorar la evaluación se puede considerar la incorporación de instancias de coevaluación y autoevaluación. Este ejercicio permitiría a los alumnos, ya casi profesionales, desarrollar el pensamiento crítico al reflexionar sobre sus fallos y errores al ponerse en el rol de evaluar tanto los diseños propios como los de sus pares. Otra propuesta de mejora podría ser la incorporación del uso de *rúbricas* para explicitar los criterios y acercarse a una metodología “más objetiva” de evaluación. Es una manera de tener una guía explícita con los distintos aspectos del desempeño de los alumnos en el desarrollo de un proyecto de ingeniería y los criterios de valoración [5].

Un desafío recurrente en la evaluación de un alumno es el equilibrio entre la valoración del producto final obtenido y los obstáculos superados teniendo en cuenta el punto de partida individual. Si bien son temas que se tratan periódicamente, no quedan formalizados en el proceso de evaluación. El ejercicio intra cátedra de desarrollar estas rúbricas servirá para reflexionar sobre lo que se debería evaluar y lo que realmente se evalúa; además de poner en común y explicitar los distintos aspectos a evaluar, sus pesos y criterios de valoración.

3. Conclusiones

El paradigma *design thinking* permitió un desarrollo fluido del proyecto, particularmente evitando retrasos y estancamientos en la definición de especificaciones, las cuales se fueron definiendo a lo largo del proyecto.

El *proyecto cero* fue una iniciativa que permitió a los alumnos rápidamente comenzar a trabajar sobre prototipos sencillos y a analizar la viabilidad de los proyectos lo antes posible. Esta iniciativa permitió mejorar el aprovechamiento del semestre y fue valorada muy positivamente por los alumnos.

La realización de un *proyecto general del curso* a partir de los subproyectos de cada grupo de trabajo resultó motivador para la participación de los alumnos en las discusiones grupales, facilitó las interacciones entre grupos y el trabajo en equipo.

En cuanto a la evaluación de los alumnos, se propone mejorar la definición de la nota final formalizando las evaluaciones parciales e incorporar herramientas para explicitar los criterios de evaluación.

4. Bibliografía

[1] UNICEF, El Aprendizaje Basado en Proyectos en PLaNEA Características, diseño, materiales e implementación. Buenos Aires, Marzo 2020. © Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF).

[2] Middlebrook, R. D, “Teaching design-oriented analysis at the first level,” In Proceedings of IEEE Frontiers in Education Conference-FIE'93 (pp. 20-21). Noviembre 1993.

[3] Qué es Design Thinking y cómo aplicarlo. Disponible en: https://www.interaction-design.org/literature/topics/design-thinking.

[4] Carrillo-García, María & Cascales-Martínez, Antonia. (2020). Innovación en los sistemas de evaluación del aprendizaje basado en proyectos. 16-28. 10.25267/Rev_estud_socioeducativos.2020.i8.3.

[5] Rico Jiménez, B. A., Garay Jiménez, L. I., & Ruiz Ledesma, E. F. (2018). Implementación del aprendizaje basado en proyectos como herramienta en asignaturas de ingeniería aplicada. RIDE Revista Iberoamericana Para La Investigación Y El Desarrollo Educativo, 9(17), 20 - 57. https://doi.org/10.23913/ride.v9i17.372.

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS EN PLANTAS INDUSTRIALES (ACERÍAS)

Fernando Issouribehere Gustavo Barbera H. Gastón Mayer Pablo Leibovich

IITREE (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos).
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata.
48 y 116, La Plata, PBA, Argentina – e-mail: fernandoi@iitree-unlp.org.ar

1. INTRODUCCIÓN

Una de las formas de obtención del acero es empleando chatarras férricas como materia prima. Para ello se utiliza exclusivamente el *horno de arco eléctrico*, el cual consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa forrado de material refractario. El mismo cuenta con electrodos, los que están conectados a un transformador que proporciona las condiciones de tensión y corriente adecuadas para producir un arco eléctrico, hasta fundir completamente el material cargado (chatarra). El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero una colada.

Los hornos de arco eléctrico representan una de las fuentes de perturbaciones eléctricas más críticas, debido a las grandes e irregulares variaciones de la corriente que absorben, sobre todo en los primeros minutos de la fusión (cuando gran parte de la chatarra se encuentra sólida).

El afino del acero se lleva a cabo en dos etapas. La primera, en el propio horno de arco, y la segunda en un *horno de tipo cuchara*, en el cual además termina de ajustarse la composición del acero y de dársele la temperatura adecuada para la siguiente fase del proceso.

Por otro lado, las acerías también cuentan con *trenes de laminación*, los que están conformados por parejas de cilindros que van reduciendo gradualmente la sección de la pieza de hierro. Dicho tren se controla de forma automática, utilizando para ello motores accionados por variadores de velocidad.

Los hornos de tipo cuchara y los trenes de laminación, aunque en menor medida que los hornos de arco eléctrico, también son considerados cargas *perturbadoras* para los sistemas eléctricos.

Los niveles de las perturbaciones generadas por estas cargas, enmarcadas en conceptos tales como Compatibilidad Electromagnética y Calidad de Energía, deben mantenerse dentro de ciertos límites puesto que, de lo contrario, podrían generar inconvenientes, no sólo dentro de la propia planta con otras cargas existentes (*sensibles* a tales perturbaciones), sino también con la empresa prestataria del servicio eléctrico.

Una división importante de las perturbaciones es entre *eventos* y *variaciones* [1]. Los *eventos* son perturbaciones repentinas con un comienzo y un final (tales como *huecos*, *interrupciones breves* y *sobretensiones*), mientras que las *variaciones* son perturbaciones de estado estacionario, o casi estacionario, que requieren mediciones continuas para su caracterización (entre ellas *armónicas*, *desbalance* y *flicker*). A continuación, se definen, de manera sucinta, estas tres últimas.

Se define a una *armónica* como una señal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema (50 Hz para Argentina). Generalmente, las armónicas se ponderan en el dominio de la frecuencia y suelen ser generadas por cargas alineales (p.e. rectificadores).

El *desbalance* de la tensión se refiere a los desequilibrios producidos en las tensiones trifásicas, que se manifiestan en diferencias en las amplitudes, o en las fases de las tensiones, fase-neutro o fase-fase.

Finalmente, se define al *flicker* como la sensación visual experimentada por un observador sometido a variaciones de la intensidad de la iluminación, a causa de una fluctuación en la tensión de alimentación.

En ese marco, el IITREE FI-UNLP asiduamente realiza estudios en diversas acerías del país, a los efectos de caracterizar el tipo y el nivel de perturbaciones presentes en las mismas. En el desarrollo de tales estudios, se efectúan mediciones de campo, con distinto tipo de equipamiento.

En el presente trabajo se presentarán resultados obtenidos en dos de las acerías más importantes del país, aquí llamadas ***Acería A*** y ***Acería B***, respectivamente.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Descripción de las Acerías

2.1.1. Acería A

En la Figura 1 se muestra un diagrama unifilar simplificado de la planta correspondiente a la Acería A. Como puede observarse, ésta es alimentada desde la red pública en 220 kV, y cuenta con dos transformadores (TR-1 y TR-2) 220 kV / 33 kV de 160 MVA cada uno, conectados en paralelo. En cuanto a cargas, posee dos hornos de arco de 120 MVA cada uno, y dos hornos de afino, de 17,4 MVA y 45 MVA, respectivamente. Asimismo, cuenta con un sistema de compensación estática (SVC).

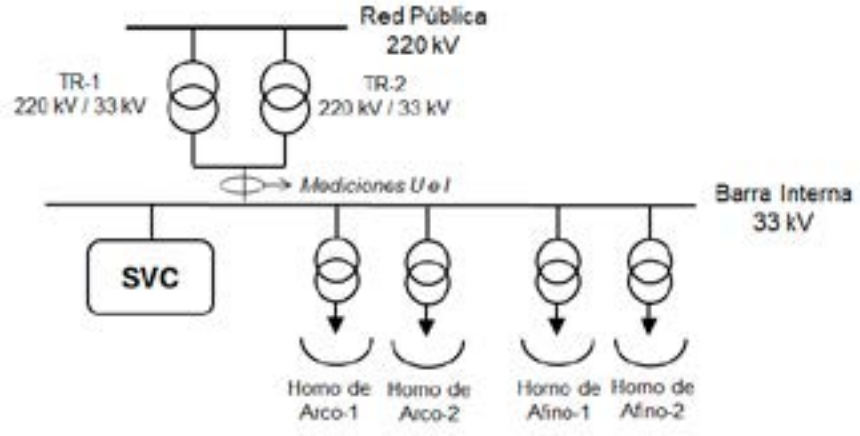


Figura 1. Diagrama unifilar simplificado – Acería A.

2.1.2. Acería B

El suministro a la planta de la Acería B se realiza en 132 kV. La alimentación del equipamiento de la acería se efectúa con dos transformadores (TR-1 y TR-2) 132 kV / 13,2 kV, TR-1 de 40 MVA y TR-2 de 30 MVA. Naturalmente, operan con barras separadas en 13,2 kV.

El TR-1 alimenta al horno de arco eléctrico, y a filtros de armónicas; mientras que el TR-2 alimenta al horno cuchara, al tren laminador, a otro filtro de armónicas y a otras cargas.

En la Figura 2 se muestra un diagrama unifilar simplificado de la planta correspondiente a la Acería B.

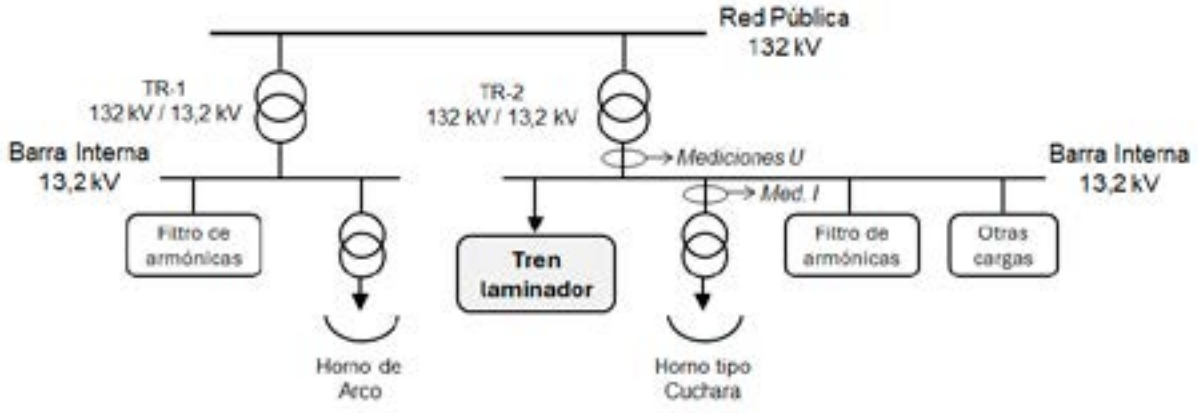


Figura 2. Diagrama unifilar simplificado – Acería B.

2.2. Presentación de resultados

2.2.1. Acería A

En lo que respecta a la Acería A, se presentarán mediciones de perturbaciones del tipo *variaciones*. En ese sentido, se mostrarán perfiles temporales de las perturbaciones definidas en la Introducción.

Como puede observarse en la Figura 1, se midieron las tres fases de la tensión en barras de 33 kV, y las tres fases de la corriente a la salida de los transformadores 220 kV / 33 kV. El período de medición fue de un mes, en forma ininterrumpida, empleando un período de integración de las magnitudes de 10 minutos. De este modo, la medición cuenta con 4464 de tales períodos.

En la Figura 3 se presenta el perfil de Potencia Activa en la entrada de la planta. A partir de este perfil, se procuró identificar los estados principales en los que operó la planta, esto es, con un horno de arco en servicio, o con ambos. Para ello, los valores de Potencia Activa fueron ordenados de manera creciente. El resultado de ello aparece en la Figura 4.

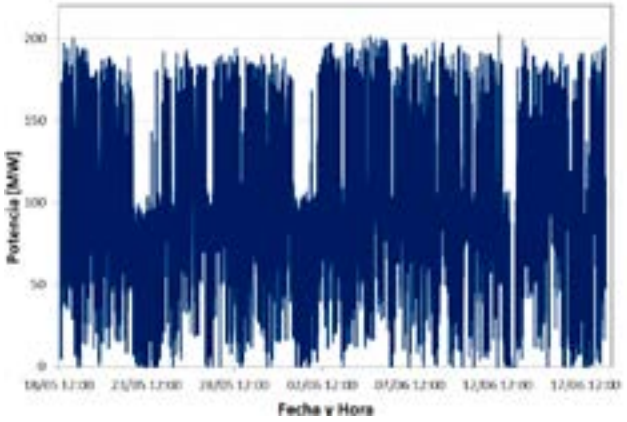


Figura 3. Potencia en la entrada de la planta.

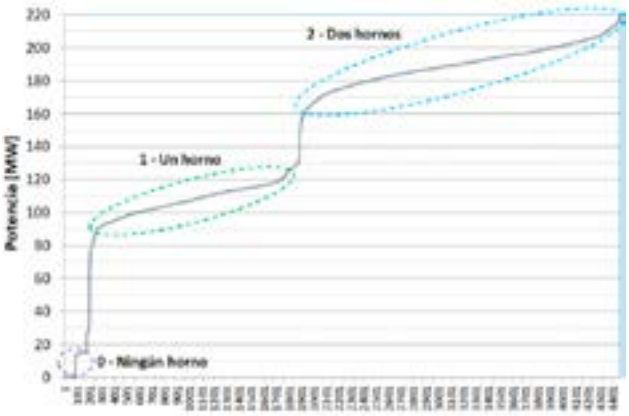


Figura 4. Potencia ordenada en forma creciente.

En esta última gráfica se presentan dos “escalones”, los que permitirían identificar los distintos estados operativos de la planta. El primer escalón representaría la transición entre el “Estado 0” (ningún horno operando) y el “Estado 1” (un horno operando), mientras que el segundo indicaría la transición entre el “Estado 1” y el “Estado 2” (dos hornos operando). El detalle sería el siguiente:

- **“Estado 0”**: Potencia por debajo de 1 MW, contiene 86 períodos de 10’.
- **“Estado 1”**: Potencia entre 90 MW y 125 MW, contiene 1534 períodos de 10’.
- **“Estado 2”**: Potencia entre 160 MW y 220 MW, contiene 2540 períodos de 10’.

En este análisis no se contempló el estado de los dos hornos de afino, debido a que su potencia es considerablemente menor que la correspondiente a los hornos de arco.

En cuanto a armónicas, en la Figura 5 se muestra el perfil de Tasa de Distorsión Total en la tensión, indicador de armónicas más conocido como ***THD*** por sus siglas en inglés (“***T**otal **H**armonic **D**istortion*”). Éste tiene por objeto brindar información global sobre el contenido armónico de determinado sitio. Para el caso de la tensión, se define de la siguiente manera:

$$THDU(\%) = \frac{\sqrt{\sum_2^N (U_h)^2}}{U_1} \cdot 100$$

En lo que respecta a las armónicas individuales, en el diagrama de barras de la Figura 6 aparecen los valores promedio y P95 para todas las componentes hasta la 20ª, para una de las fases (los niveles de las otras dos son similares). También se ha incluido el THD.

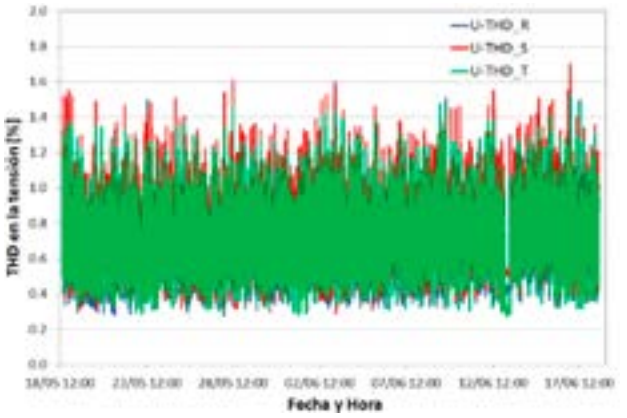


Figura 5. THD [%] en la tensión.

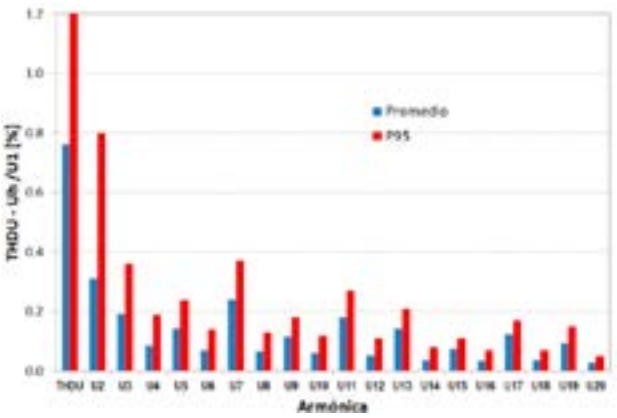


Figura 6. THD y armónicas individuales en la tensión [%]. Valores medios y P95.

Cabe destacar que el P95 (Percentil 95), representa el valor superado por sólo el 5 % de los intervalos de 10’ que componen dicha medición. Es un valor cercano al máximo y es el que debe compararse con lo indicado en las Normas, a fin de ponderar cierta instalación en términos de Calidad de Energía.

El contenido armónico fue compatible con el tipo de carga existente en la planta, en el sentido que se presentan armónicas pares, del mismo orden – o inclusive mayor en ciertos casos – que las correspondientes impares.

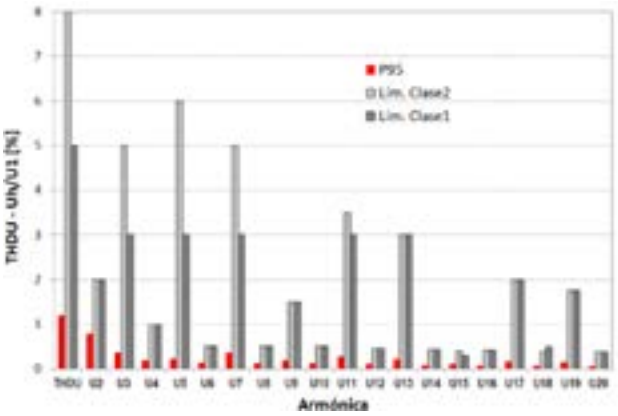


Figura 7. THD y armónicas individuales en la tensión [%]. comparados con los límites de [2].

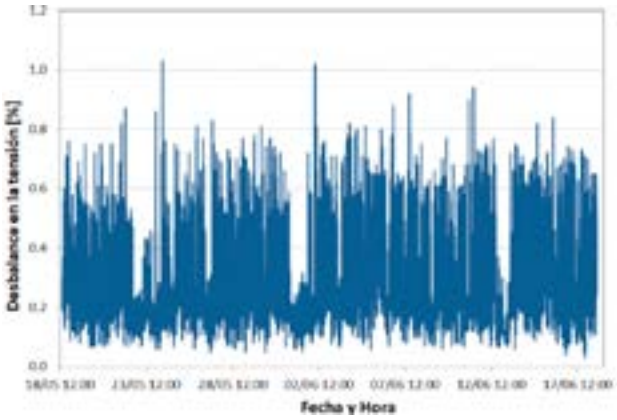


Figura 8. Desbalance en la tensión.

A los efectos de ponderar el contenido armónico presente en barras de 33 kV, se hizo uso de la Norma [2], cuyo objeto es justamente brindar niveles de compatibilidad de distintos parámetros de Calidad de Energía para redes industriales. Esta Norma define diversas Clases de redes, conforme a su calidad. En la Figura 7 se comparan los valores de armónicas medidos (P95) con los correspondientes niveles de compatibilidad paras las redes Clase 1 y Clase 2. Los niveles medidos cumplieron holgadamente los límites, inclusive los más estrictos, establecidos en la Norma (Clase 1).

En cuanto al Desbalance, la forma correcta de medirlo es mediante el cociente entre las componentes de secuencia inversa y directa, respectivamente. El perfil de desbalance en la tensión se muestra en la Figura 8. El valor medio resultó 0,30 %, mientras que el P95; 0,62 %.

Para evaluar estos resultados en términos de grado de cumplimiento, nuevamente se utilizó la Norma [2]. En ese sentido, para redes Clase 1 y Clase 2, esta Norma establece como nivel de referencia para el desbalance 2 %. Por lo tanto, se concluye que el grado de cumplimiento fue elevado.

Finalmente, se mostrarán los resultados de flicker. En la Norma [3] se definen el Pst (indicador de flicker de corto término) y el Plt (indicador de flicker de largo término) con el objeto de ponderar este fenómeno. El Plt se calcula a partir del Pst, de la siguiente manera:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{stn}^{\ 3}}{12}}$$

Es decir, para el cálculo del Plt se emplean los 12 valores de Pst previamente registrados. En la mayoría de los países, incluido la Argentina, se utiliza el Pst para regular el flicker. Por otro lado, la Norma [4] de amplia aplicación en Europa, sugiere el empleo del Plt.

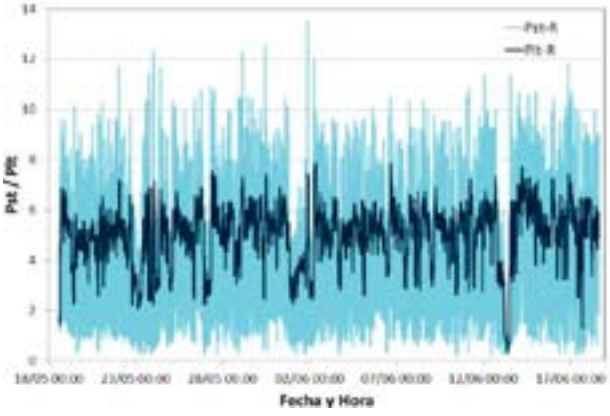


Figura 9. Pst y Plt. Fase R.

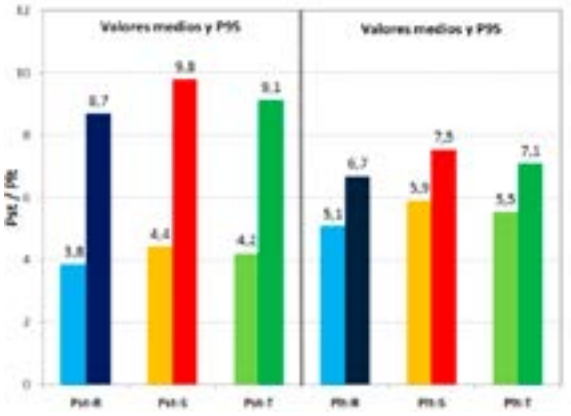


Figura 10. Pst y Plt en las tres fases. Valor medio y P95.

En ese marco, en la Figura 9 se muestran los perfiles de Pst y Plt, para la fase R, para la totalidad del período de medición. El valor recomendado de Pst para redes públicas es 1.

Debido al efecto “promediador” que el Plt posee, la excursión de valores que éste presenta a lo largo del período de medición es sensiblemente menor que la correspondiente al Pst.

Este concepto se pone de manifiesto también en el diagrama de barras de la Figura 10, en el que se han representado los valores medio y P95, en las tres fases, tanto para el Pst como para el Plt.

Prueba de estimadores de planeamiento de redes

A continuación, se empelarán los resultados de las mediciones de flicker para comprobar ciertas ecuaciones existentes en la Normativa internacional para el planeamiento de redes.

- *Relación entre Plt95 y Pst95:*

En el documento [5] se indica que, en redes cercanas a industrias, conteniendo grandes hornos de arco, pudo comprobarse una vinculación directa entre los valores P95 del Pst y del Plt, señalando de hecho que existiría cierta redundancia al medir sendos indicadores. Dicha relación es:

$$P_{lt95} = 0,84 \cdot P_{st95}$$

De las mediciones, este factor fue del orden de 0,77; es decir, un valor cercano a lo propuesto.

- *Relación entre Pst99 y Pst95:*

Por otro lado, el Reporte Técnico (RT) [6] indica que una herramienta para evaluar un registro de flicker es comparar los valores P99 y P95 de Pst. En ese sentido, señala que, en una medición típica, en la que se encuentren presentes hornos de arco, el cociente Pst99/Pst95 debería ser inferior a 1,3. Los resultados de las mediciones mostraron una relación de 1,17, cumpliendo lo allí establecido.

- *Agregación de distintas fuentes de flicker:*

En el mismo RT se aborda un punto importante, que es cómo “sumar” el efecto de distintas cargas que generan flicker. En ese sentido, el RT propone la siguiente ley de agregación:

$$P_{st} = \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^{N} P_{sti}^{\ \alpha}}$$

Donde Pst_i es generado por cada carga en particular, y *Pst* es el resultante de la agregación de las distintas cargas. *N* es el número de cargas que aportan al flicker resultante.

Asimismo, sugiere distintos valores para el exponente α (naturalmente, cuando mayor sea α, menor será el Pst resultante) según la operación de las cargas existentes en la industria:

- α= 4: Debería emplearse cuando la generación de flicker en simultáneo es poco probable.
- α= 3: Debería usarse para la mayoría de las cargas que generan flicker, cuando la probabilidad de coincidencia es baja.
- α= 2: Debería usarse cuando las fluctuaciones coincidentes son probables.
- α= 1: Cuando la coincidencia de fluctuaciones es muy probable (suma lineal).

El RT también advierte que el grado de exactitud de esta ley de agregación de fuentes de flicker es sensiblemente dependiente de qué percentil se utiliza para efectuar los cálculos. En este marco, el próximo paso es aplicar esta fórmula con los distintos valores de los coeficientes y comparar los resultados obtenidos. Para ello, se emplea el concepto de los distintos estados de la Planta, Figura 4.

Se presentan a continuación el resultado de las pruebas de agregación de flicker:

Empleando valores medios:

- $Pst\text{-}med_{1\text{-}H}$= 3,3. N= 2.
  - Si α= 2 → $Pst\text{-}med_{2\text{-}H}$= 4,7 (el medido fue 5,4)
  - Si α= 3 → $Pst\text{-}med_{2\text{-}H}$= 4,2 (el medido fue 5,4)

Empleando valores P95:

- $Pst95_{1\text{-}H}$= 8,1. N= 2.
  - Si α= 2 → $Pst95_{2\text{-}H}$= 11,4 (el medido fue 10,4)
  - Si α= 3 → $Pst95_{2\text{-}H}$= 10,2 (el medido fue 10,4)

Empleando valores P99:

- $Pst99_{1\text{-}H}$= 9,6. N= 2.
  - Si α= 2 → $Pst99_{2\text{-}H}$= 13,5 (el medido fue 11,9)
  - Si α= 3 → $Pst99_{2\text{-}H}$= 12,1 (el medido fue 11,9)

Se observa que los resultados provenientes de aplicar la fórmula de agregación propuesta se encontraron en un todo de acuerdo con lo que arrojaron las mediciones. La coincidencia fue mayor aplicando los valores P95, donde el resultado de la medición se encontró dentro del rango de aplicar la ley de agregación de fuentes de flicker con α= 2 y α= 3.

Para el indicador P95, el valor de α que cumpliría la ecuación en forma exacta es α= 2,78.

2.2.2. Acería B

A diferencia de lo tratado en el caso de la Acería A, para la Acería B las perturbaciones abordadas son aquellas de tipo *eventos*, particularmente en lo concerniente a la corriente de energización del horno cuchara y su impacto en la tensión de la barra de 13,2 kV.

La energización del horno cuchara se realiza cerrando el interruptor de bloque del transformador y el horno, pero con los electrodos del mismo izados. Por lo tanto, esta acción equivale a la energización del transformador en vacío y luego de algunos segundos se bajan los electrodos, se establecen los arcos eléctricos y comienza la circulación de corriente.

La corriente de inserción (*inrush*) del transformador del horno tipo cuchara presenta un valor cresta elevado. Esta corriente de inserción provoca una caída de tensión de la barra de 13,2 kV, la cual afecta el desempeño del tren laminador, llegando en ciertas ocasiones a sacarlo de servicio. El tren, en este caso, hace las veces de carga *sensible* a perturbaciones. Cabe recordar que ambas cargas se encuentran en la misma barra de 13,2 kV.

En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran los oscilogramas de corriente de inserción del horno cuchara y de tensión en la barra de 13,2 kV, respectivamente. Asimismo, en la Figura 13 y la Figura 14 se muestran los perfiles de los respectivos valores eficaces de sendas variables, calculados ciclo a ciclo. En ambas figuras de la tensión, puede observarse el *hueco* de tensión que se genera durante la energización del horno cuchara, el cual sería el principal responsable de las fallas en el tren laminador.

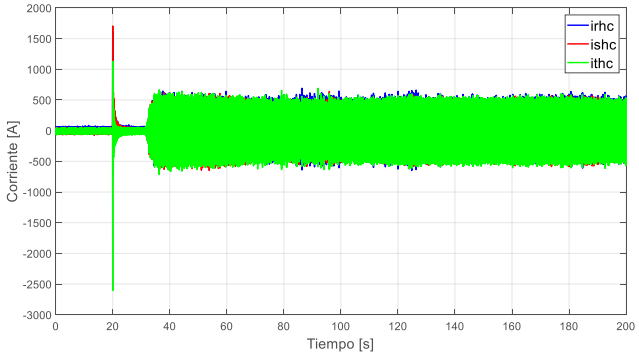


Figura 11. Oscilogramas de corrientes durante la inserción del horno cuchara.

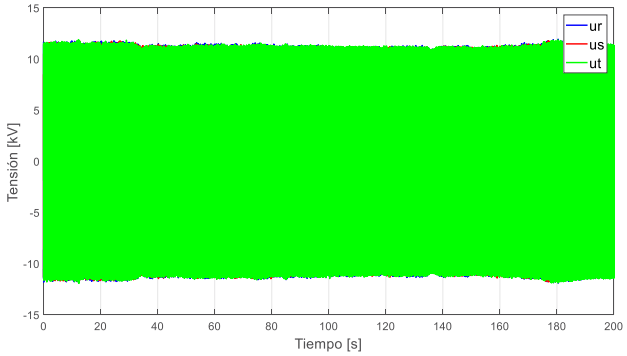


Figura 12. Oscilogramas de tensiones en barra de 13,2 kV durante la inserción del horno cuchara.

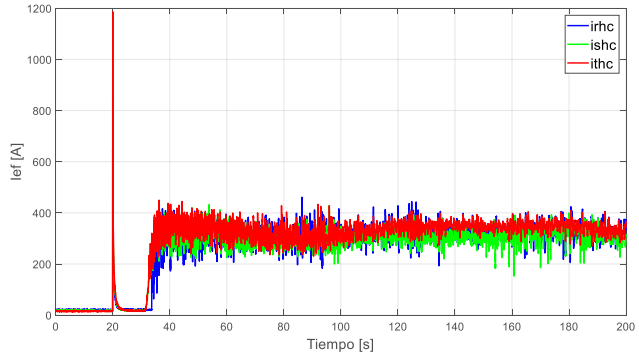


Figura 13. Valores eficaces de corrientes durante la inserción del horno cuchara.

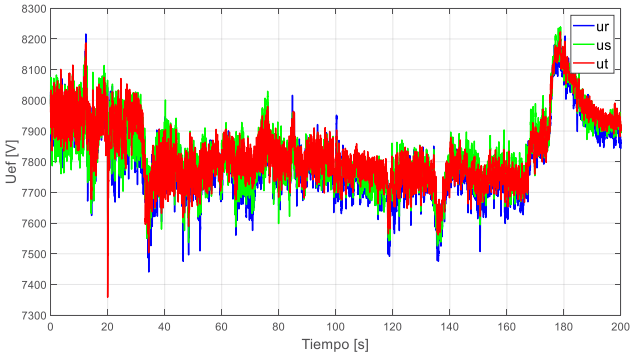


Figura 14. Valores eficaces de tensiones en barra de 13,2 kV durante la inserción del horno cuchara.

A los efectos de estudiar el impacto del horno cuchara en la calidad de tensión de la barra de 13,2 kV de alimentación al tren laminador, se realizó un modelo en el programa Simulink de MATLAB. Los distintos bloques que conforman el mismo se presentan en la Figura 15.

El horno tipo cuchara y el tren laminador se modelaron como generadores de corriente controlados, que inyectan las corrientes medidas en la barra de 13,2 kV.

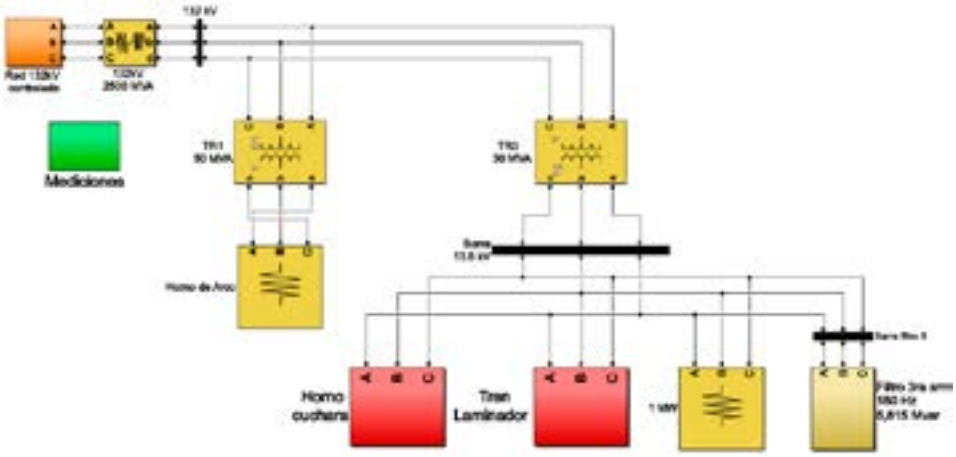


Figura 15. Modelo Simulink de alimentación de la barra de 13,2 kV del tren laminador.

Los resultados obtenidos de comparar el valor eficaz de la tensión de la barra de 13,2 kV de alimentación del tren laminador, tanto medidos como simulados se presentan en la Figura 16. Éstos muestran una buena concordancia entre el modelo y las mediciones reales, representando adecuadamente las variaciones bruscas de la tensión.

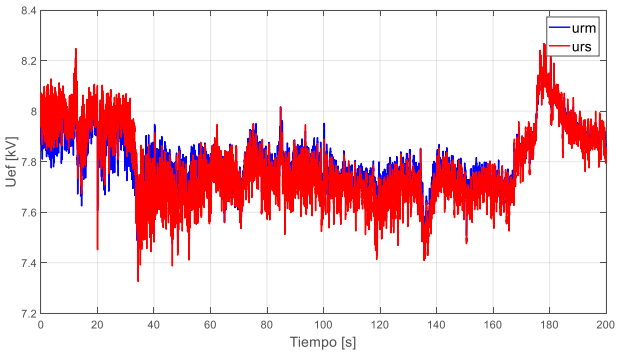


Figura 16. Valor eficaz de la tensión de la fase R medido y simulado.

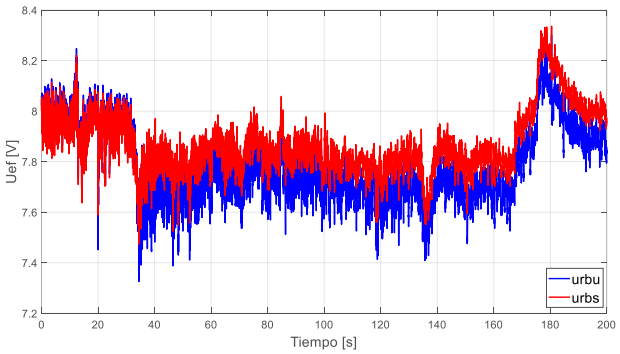


Figura 17. Valor eficaz de la tensión de la fase R con el horno tipo cuchara en la misma barra (urbu) y alimentado desde otro transformador (urbs).

Por requerimientos del personal de la Acería B, se analizó la alternativa de segregar a la supuesta carga perturbadora, es decir, alimentar al horno tipo cuchara desde otro transformador. La nueva configuración de la planta se presenta en la Figura 18.

Los resultados obtenidos para los valores eficaces de tensión en la barra de 13,2 kV que alimenta al tren laminador, con el horno tipo cuchara alimentado desde dicha barra o desde una barra separada se presentan en la Figura 17. Se observa una considerable reducción en la caída de tensión, al entrar en servicio el horno tipo cuchara, si se emplean barras separadas (perfil rojo).

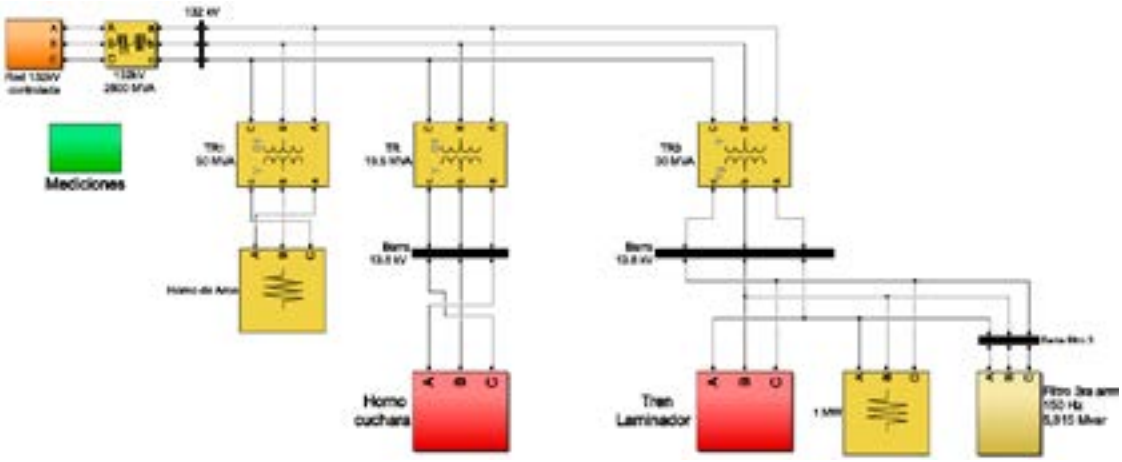


Figura 18. Modelo Simulink alimentando al horno tipo cuchara desde un transformador dedicado.

Cabe señalar que otra opción posible sería continuar operando con la barra unida, pero trabajando sobre el tren laminador a los efectos de mejorar su sensibilidad a huecos de tensión.

3. CONCLUSIONES

- Las Acerías cuentan con diversos tipos de cargas que, en condiciones normales de operación, generan perturbaciones eléctricas: tanto las llamadas *variaciones* como las de tipo *eventos*.

- Es menester caracterizar dichas perturbaciones, y mantenerlas dentro de ciertos límites, a fin de evitar no sólo inconvenientes de Compatibilidad Electromagnética dentro de la planta, sino también de Calidad de Energía con la empresa prestataria del servicio eléctrico.

- En cuanto a la **Acería A**, en la cual se abordaron parámetros de Calidad de Energía del tipo *variaciones*:

  - Se presentaron componentes armónicas no sólo impares, sino también pares. Esto es debido al comportamiento altamente perturbador de los hornos de arco de gran potencia.
  - Los valores de armónicas en la tensión fueron bajos. De hecho, se cumplieron, y de manera holgada, los niveles de referencia de [2] para la Clase más exigente.
  - El desbalance en la tensión también cumplió holgadamente con los valores recomendados en [2].
  - Los valores de flicker medidos fueron particularmente elevados. Del orden de 10 veces por encima de los niveles de referencia para redes públicas.
  - Se comprobaron empíricamente afirmaciones existentes en diferentes documentos y reportes técnicos de reconocido valor, entre las que se destaca la ley de agregación de distintas fuentes de flicker.

- Con respecto a la **Acería B**, donde se abordaron parámetros de Calidad de Energía del tipo *eventos*:

  - Se detectaron huecos en la tensión al entrar en servicio el horno de tipo cuchara.
  - Si bien la situación de calidad de la barra de 13,2 kV, considerando que es una barra industrial destinada a cargas perturbadoras, puede considerarse adecuada, estos eventos podrían ser los causantes de fallas en el tren laminador.
  - Se comprobó mediante un modelo de simulación en el programa Simulink de MATLAB (validado con las mediciones realizadas en campo) que la alimentación del horno tipo cuchara desde un transformador dedicado, reduciría la amplitud de las variaciones de tensión.
  - Se recomienda además que las anomalías que fueran detectadas en la operación del tren laminador se investiguen por el lado de la sensibilidad de dicha carga.

4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Math H. J. Bollen, Irene Y. H. Gu. "Signal Processing of Power Quality Disturbances". Wiley-IEEE Press, 2006.

[2] IEC 61000-2-4: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.

[3] IEC 61000-4-15: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications.

[4] EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks

[5] "Power Quality Indices and Objectives". Joint Working Group CIGRE C4.07 / CIRED, March 2004.

[6] IEC 61000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems.

CONTROL POR MODO DESLIZANTE DE OSCILADORES ANDRONOV-HOPF. APLICACIÓN AL CONTROL DE INVERSORES FORMADORES DE RED

Del Negro Andrés, De Battista Hernán, Inthamoussou Fernando A.

Instituto LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 1900. E-mail: andresdn44@gmail.com

1. Introducción

Históricamente, la generación eléctrica ha estado mayormente a cargo de centrales térmicas e hidroeléctricas. Estas plantas de generación emplean grandes máquinas sincrónicas para la generación de electricidad. El objetivo primario del control de estas plantas de generación es la regulación de tensión y frecuencia. Esta regulación es lograda a través del control del excitador y del regulador de potencia mecánica, respectivamente. La regulación de estas variables fundamentales tiene por fin sostener el funcionamiento de los sistemas de potencia ante fluctuaciones de la oferta y demanda de energía, como así también ante fallas de la red de transmisión.

La inercia en los sistemas de potencia [1], hace referencia a la energía cinética almacenada en las grandes máquinas rotantes. Esta energía almacenada puede ser volcada a la red para suplir transitoriamente un déficit de oferta ocasionado por la salida de servicio de un generador. Similarmente, los grandes generadores pueden almacenar energía en exceso ante una falla en la red. Esta respuesta temporal, generalmente disponible en la escala de unos pocos segundos, da tiempo a los sistemas mecánicos de control a responder ante las fallas en el sistema de potencia.

La creciente demanda de energía limpia en los sistemas de potencia modernos se encuentra en crecimiento, impulsada por factores como precios del combustible y regulaciones. Las fuentes de energía renovables están comenzando a dominar la generación [2]. Estas fuentes en general no son conectadas directamente a la red (ya sea porque generan tensión continua o bien tensión alterna a una frecuencia no uniforme), sino a través de inversores electrónicos que hacen de interfaz entre la red y los generadores renovables. La naturaleza intermitente de estos recursos (energía solar o eólica en su mayoría) hace que los inversores tiendan a extraer la máxima potencia disponible en todo momento y alimentar la red con la energía extraída. Tradicionalmente, los inversores son controlados para sincronizarse con una red existente mediante el uso de un "Phase locked loop" (PLL). Estos inversores son conocidos como "Grid following inverters" (GFLI). Este particular comportamiento de seguidor de red se asemeja a una fuente de corriente. Operando de esta manera, los generadores renovables son incapaces de proveer inercia a la red, aun cuando incluyan máquinas rotantes.

La falta de inercia de estos nuevos actores en la generación motiva la importancia de cambiar el paradigma con el que se inyecta energía a la red. De esta manera, la nueva perspectiva se basa en el uso de inversores del tipo “Grid Forming Inverters” (GFMI), los cuales no solo tienen como objetivo inyectar la energía generada a la red, sino que también se ocupan de mantener sus variables [3] simulando un comportamiento inercial mediante un adecuado control de los inversores. Los métodos de control dentro de este tipo de inversores pueden ser clasificados en "Droop control", el cual se basa en mantener relaciones lineales entre las variables eléctricas (tensión y frecuencia) y las potencias (activa y reactiva); "Synchronous-machine-based control', enfocado en emular la respuesta inercial de un generador sincrónico; y "Virtual oscillator-based (VOC)" [4], entre otros. En particular, esta última estrategia de control consiste

en controlar los inversores para emular la dinámica de osciladores de ciclo límite débilmente no lineales, como los osciladores de zona muerta o de Van der Pol. Estos osciladores pueden generar oscilaciones periódicas, auto-sostenidas y estables, y cuando se utilizan como controladores en red, ofrecen sincronización sin comunicación y uso compartido de energía, así como regulación de tensión y frecuencia. Diferentes análisis también muestran que estos osciladores mantienen de manera implícita la característica de "Droop". Los osciladores mencionados exhiben el molesto tercer armónico, el cual no es deseable en redes eléctricas ya que provoca corrientes por el conductor neutro en redes trifásicas. Por esta razón, las investigaciones fueron direccionadas al uso de osciladores basados en el oscilador armónico modificado conocido como Andronov-Hopf. Este tipo de osciladores ha sido utilizado en [5] para implementar un controlador del tipo VOC.
En este trabajo, se propone modificar este tipo de osciladores de manera de lograr mejores propiedades de convergencia y robustez, para luego ser implementado en un inversor trifásico. Para lograr esto, se utiliza un algoritmo de control de modo deslizante de segundo orden llamado “super-twisting”. Este algoritmo puede ser diseñado a medida de las perturbaciones y el ruido a los que es sometido el oscilador para garantizar un tiempo de convergencia finito que puede ser especificado a priori [6]. Esta es una diferencia sustancial con los controladores lineales y no lineales existentes que sólo ofrecen convergencia exponencial o asintótica. Además, a diferencia de otras propuestas, se espera que las propiedades de robustez permitan diseñar estrategias “Droop” lineales a pesar de las no linealidades e incertidumbres del sistema.

2. Diseño del sistema de VOC del inversor

2.1. Control de modo deslizante del oscilador

Dinámica del Oscilador Andronov-Hopf

El comportamiento dinámico del oscilador de Andronov-Hopf se representa como

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \omega\, x + x\, u, \quad u = X^2 - ||x||^2,$$

donde ω denota la frecuencia de resonancia a la cual el oscilador exhibe oscilaciones sinusoidales no forzadas y, a diferencia del oscilador armónico, la amplitud en régimen permanente es determinada por el valor de X, independientemente de la condición inicial. La dinámica del oscilador puede alternativamente representarse en coordenadas polares, tomando la forma

$$\dot{r} = u \cdot r = \left(X^2 - r^2\right) r, \quad \dot{\theta} = -\omega,$$

donde es inmediato notar que la fase se mantiene independiente del control u, mientras que la amplitud r de la oscilación converge asintóticamente a su valor de estado estacionario con un tiempo de subida inversamente proporcional a la amplitud.

Control por modo deslizante del oscilador

El algoritmo de modo deslizante de segundo orden del tipo super-twisting suele ser representado por el siguiente modelo dinámico:

$$\dot{z}_1 = -2\,\beta\,|z_1|^{1/2}\,\mathrm{sign}(z_1) + z_2 + w_1(t,x), \quad \dot{z}_2 = -\alpha\,\mathrm{sign}(z_1) + w_2(t,x),$$

donde las señales $w_{1,2}(t,x)$ hacen referencia a las perturbaciones. Este algoritmo ofrece la propiedad de convergencia en tiempo finito al origen aún en presencia de perturbaciones apropiadamente acotadas.
Se propone en este trabajo aplicar una acción de control tal que implemente un algoritmo

super-twisting en el oscilador Andronov-Hopf descripto en coordenadas polares. Para ello, se propone reemplazar la acción de control u original por $u = -\frac{1}{r} z - \frac{1}{r} 2\beta |r - X|^{1/2} \text{sign}(r - X)$, $\dot{z} = \alpha \text{ sign}(r - X)$. Reescribiendo la dinámica en función del error de amplitud $s = r - X$, se llega a lo siguiente:

$$\dot{s} = - z - 2\beta |s|^{1/2} \text{sign}(s), \quad \dot{z} = \alpha \text{ sign}(s), \quad \dot{\theta} = - \omega.$$

Puede notarse que la dinámica del oscilador se extiende en un orden por la dinámica del controlador. Se observa, asimismo, que la dinámica de la fase se mantiene inalterada mientras que la dinámica de la amplitud sigue la ley impuesta por el algoritmo super-twisting asegurando convergencia en tiempo finito a $s = 0$, es decir, a $r = X$. Luego, transformando a coordenadas cartesianas se obtiene el sistema:

$$\dot{x}_1 = - x_2 \omega - \frac{z x_1}{\|x\|} - \frac{2\beta x_1}{\|x\|} |s|^{1/2} \text{sign}(s), \quad \dot{x}_2 = x_1 \omega - \frac{z x_2}{\|x\|} - \frac{2\beta x_2}{\|x\|} |s|^{1/2} \text{sign}(s), \quad \dot{z} = \alpha \text{ sign}(s),$$

con $s = \|x\| - X$. Los parámetros α y β serán elegidos de manera de alcanzar convergencia en el tiempo deseado y lograr un adecuado rechazo a perturbaciones.
La acción de control en coordenadas cartesianas está dada por la expresión:

$$u = - \frac{z}{\|x\|} - \frac{2\beta}{\|x\|} |s|^{1/2} \text{sign}(s), \quad \dot{z} = \alpha \text{ sign}(s),$$

con $s = \|x\| - X$. En la Fig. 1 puede verse las señales x_1 y x_2 junto a la acción de control u para que el sistema comience a oscilar en la simulación.

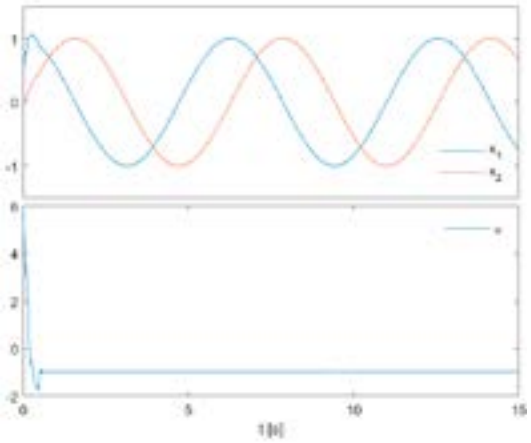


Figura 1. Parámetros del sistema: X = 1, ω = 1, α= 8 y β= 2. Condiciones iniciales: x_1=0,5 y x_2=0.

Tiempo de convergencia

Puede demostrarse que el tiempo de convergencia del oscilador a su amplitud de referencia queda acotado superiormente por:

$$t_f = \frac{2}{\sigma} \left[\frac{1}{4} \gamma^2 \zeta_0^T E \zeta_0 \right]^{1/2}.$$

Donde:

$$\zeta_0 = \begin{bmatrix} 2 |s(t_0)|^{1/2} \text{sign}(s(t_0)) \\ z(t_0) \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \beta^2 + \alpha - \beta & -(\beta - 1) \\ -(\beta - 1) & 2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\beta & 1 \\ -\alpha/2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\sigma = \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_{máx}(E)}, \quad \bar{\lambda} = \lambda_{min}(F), \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{mín}(E)}}, \quad F = -[A^T E + EA].$$

con $\lambda_{mín}(.)$ y $\lambda_{máx}(.)$ los autovalores mínimo y máximo de la matriz, respectivamente. Inicializando el sistema de la Fig. 1 desde $x_1 = 0.5$ y $x_2 = 0$, la cota para el tiempo de convergencia es de $t_f = 22.39$s, lo cual podemos ver que se cumple.

2.2. Control VOC para inversor formador de red

En esta sección el oscilador propuesto será utilizado para implementar el comando de control de un inversor trifásico. Las señales sinusoidales y ortogonales provistas por el oscilador serán de utilidad para generar la secuencia de un control PWM a partir de las transformadas desde el plano alfa-beta. En el caso típico de redes inductivas, la inyección de potencia a la red tiene las expresiones:

$$P = 3\frac{V\,V_g}{X_s}\,\delta, \quad Q = 3\left(\frac{V\,V_g - V_g^2}{X_s}\right).$$

Estas expresiones justifican la práctica habitual de controlar la potencia reactiva a través de la tensión del inversor (V), y la potencia activa mediante la diferencia de fase (δ) entre la tensión del inversor y la tensión de red. En estas expresiones, V_g es la amplitud de la tensión de la red y X_s es la reactancia inductiva de la red.

Un esquema eléctrico del sistema de control se muestra en Fig. 2. En el interior del cuadro sombreado se encuentra el sistema de control, mientras que el resto del circuito se corresponde con el sistema de potencia. A los fines de este trabajo, el inversor está representado como un generador trifásico de tensión controlada, mientras que la red es modelizada como otro generador de tensión trifásica con una impedancia serie predominantemente inductiva. El controlador está compuesto de dos partes, i) un tanque resonante cuya frecuencia de oscilación es $\omega_{nom}=\frac{1}{\sqrt{LC}}$, y ii) fuentes de corriente y tensión controladas no lineales para transformar el oscilador armónico LC en un Andropov-Hopf con convergencia super-twisting.

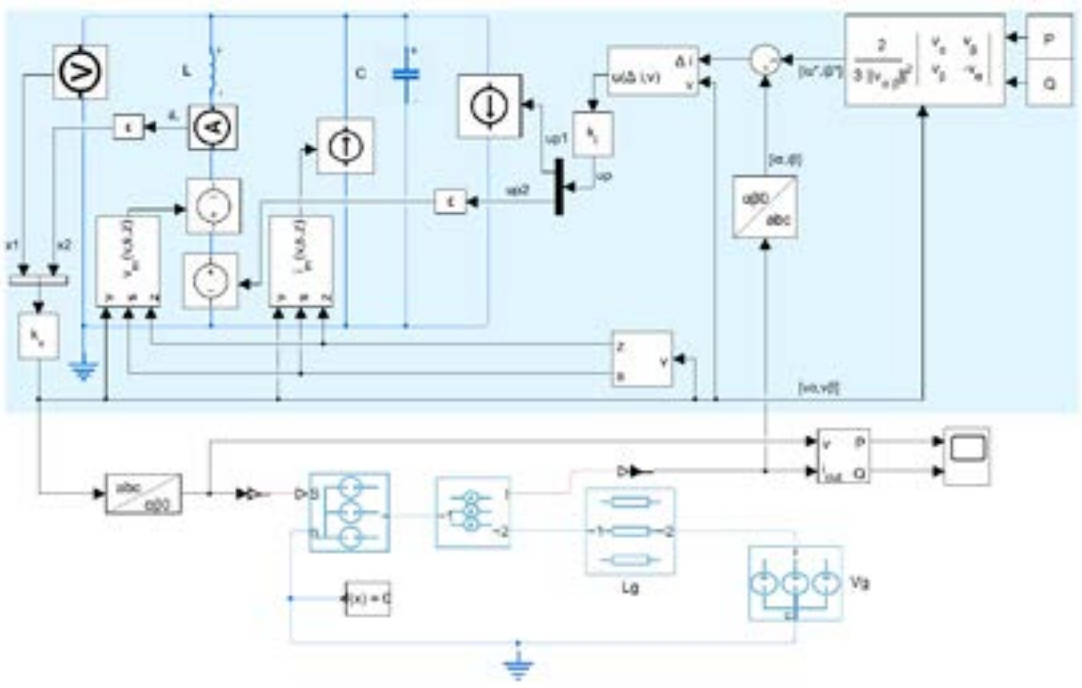


Figura 2: Inversor trifásico con el controlador basado en el oscilador no-lineal propuesto.

La dinámica del tanque resonante queda representada por la tensión del capacitor y la corriente del inductor:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_C \\ \varepsilon\, i_L \end{bmatrix},$$

donde $\varepsilon = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Por su parte, las fuentes de tensión y corrientes están controladas de acuerdo con las expresiones deducidas anteriormente:

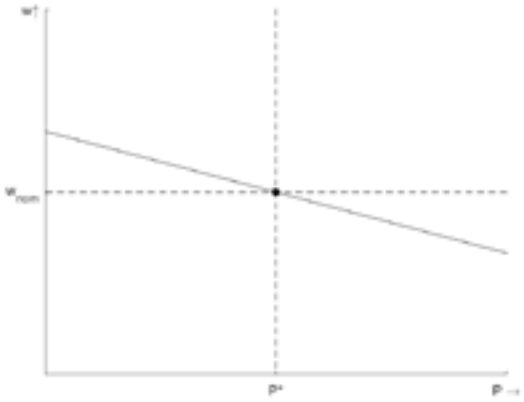


Figura 3: Característica de caída ω-P.

$$v_m = \left(- \frac{z}{\|x\|} - \frac{2\,\beta}{\|x\|} |s|^{1/2} \operatorname{sign}(s) \right) \frac{1}{\omega_{nom}} x_2,$$

$$i_m = \left(- \frac{z}{\|x\|} - \frac{2\,\beta}{\|x\|} |s|^{1/2} \operatorname{sign}(s) \right) \frac{1}{\omega_{nom}\,\varepsilon} x_1,$$

$$\dot{z} = \alpha \operatorname{sign}(s),$$

con $s = \|x\| - X$.

Los estados del sistema son escalados por la constante k_v para lograr la amplitud nominal de la tensión:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = k_v \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Luego, las corrientes abc del inversor son transformadas al plano alfa-beta y se las compara con corrientes de referencia, esto es realimentado con:

$$u_p = \begin{bmatrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix} = k_i \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha - i_\alpha^* \\ i_\beta - i_\beta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} - v_\beta \\ v_\alpha \end{bmatrix},$$

donde k_i es usada para escalar los valores de corriente. La corriente de referencia se obtiene de:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3\,V^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix},$$

con P* y Q* las referencias de potencia. Finalmente, el sistema eléctrico toma la forma de:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_\alpha \\ \dot{v}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \frac{z\,k_v}{V} - \frac{2\,\beta\,k_v}{V} |s|^{1/2} \operatorname{sign}(s) & - \omega_{nom} \\ \omega_{nom} & - \frac{z\,k_v}{V} - \frac{2\,\beta\,k_v}{V} |s|^{1/2} \operatorname{sign}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{k_v\,k_i}{C} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha - i_\alpha^* \\ i_\beta - i_\beta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -v_\beta \\ v_\alpha \end{bmatrix},$$

es decir que se recupera el modelo del oscilador controlado por modo deslizante con un término extra correspondiente a la realimentación de potencia activa. Puede comprobarse que esta realimentación le confiere al sistema de control la característica droop. Con el cambio de variables $V = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}$, $\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)$ se obtiene:

$$\dot{V} = - z\,k_v - 2\,\beta\,k_v\,|s|^{1/2} \operatorname{sign}(s),$$

$$\dot{\theta} = \omega_{nom} - k_p\,(P - P^*),$$

con $k_p = \frac{2}{3}\frac{k_i C}{K_v}$. Puede notarse que la dinámica de la fase depende de la diferencia entre la potencia activa actual y la de referencia. Considerando estado estacionario, las derivadas quedan

$$\dot{\theta} = \omega = \omega_{nom} - k_p\,(P - P^*),$$

$$\dot{V} = 0 = - z\,k_v - 2\,\beta\,k_v\,|s|^{1/2} \operatorname{sign}(s).$$

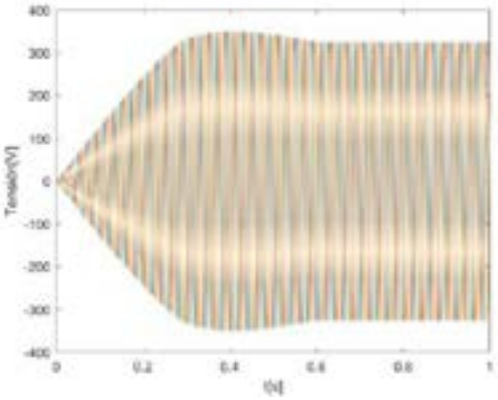


Figura 4. Puesta en marcha del sistema con $\alpha = 8$, $\beta = 2$.

La característica de la fase ha sido graficada en la Fig. 3, donde puede verse que la variación de frecuencia es lineal con respecto a la diferencia de potencia activa, es decir que mantiene la característica de droop típica de una red inductiva. Por su parte, la amplitud de la tensión

no sufre efecto alguno, dado que en este trabajo no se considera realimentación de potencia reactiva.

3. Resultados

A modo de validación, se implementó una red eléctrica inductiva en la simulación con una inductancia de 3mH y una tensión de línea de 400V. El inversor es implementado con una fuente de tensión trifásica controlada. En la Fig. 4 se observa cómo el sistema alcanza la tensión nominal en tiempo finito con la curva característica del algoritmo super-twisting. Luego, el sistema es estudiado bajo diferentes modos de funcionamiento (modo en red y modo aislado). En modo aislado, la carga es puramente resistiva. Las variables características del inversor han sido graficadas en la Fig. 5 (potencia entregada, tensión, corriente y frecuencia). Siendo el caso más crítico cuando se conmuta desde modo aislado al modo en red en el instante t = 3s. Durante toda la simulación la amplitud de la tensión se mantiene prácticamente constante mientras que la corriente varía acorde a las demandas de potencia.

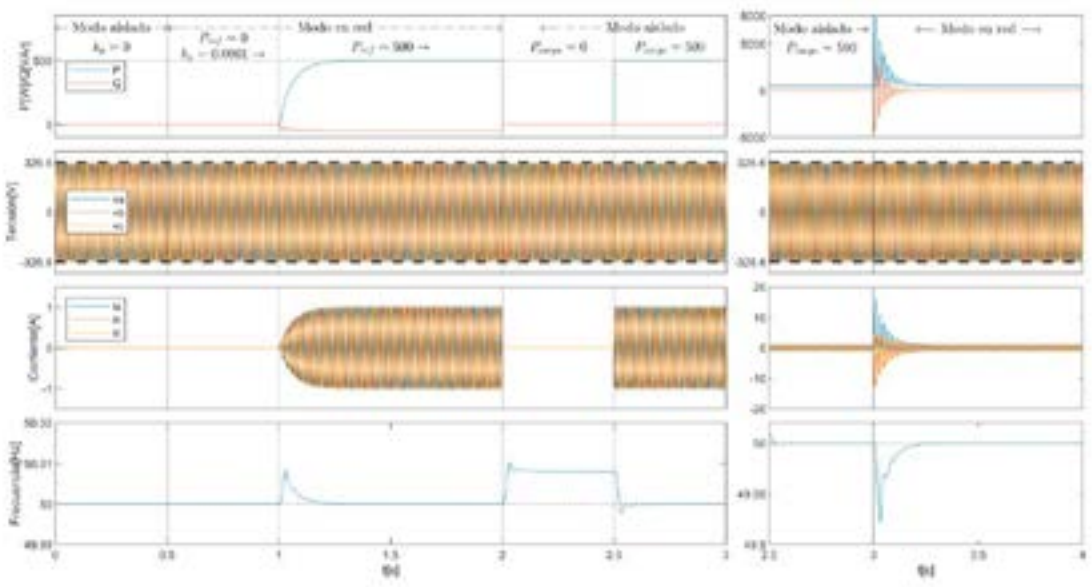


Figura 5. Variables de la red eléctrica con el inversor propuesto.
Red: L_G = 3mH y V_G = 400V.

4. Conclusiones

El controlador propuesto logra mantener las características del mencionado AHO (no tiene armónicos, genera dos señales ortogonales) mientras mejora el tiempo de convergencia y el rechazo de perturbaciones, el cual puede ser diseñado para la aplicación especifica. Esto ha sido verificado mediante las simulaciones pertinentes. Otra de las ventajas del sistema es que no cambia la amplitud de tensión para los diferentes estados de carga, según sea modo aislado o modo en red y logra sincronización automática al ser conectado a red.
Futuros trabajos sobre este tema estarán relacionados con estudiar la estabilidad de un sistema de varios osciladores acoplados por una red, agregar realimentación de potencia reactiva al sistema y evaluar las ventajas de cambiar el algoritmo de control en el seguimiento de la potencia inyectada. También es posible elaborar un mejor rechazo de perturbaciones basado en un mejor conocimiento de los factores que afectan al inversor.

5. Bibliografía

[1] Denholm, P., Mai, T., Kenyon, R. W., Kroposki, B., & O'Malley, M. (2020). Inertia and the power grid: A guide without the spin (No. NREL/TP-6A20-73856). National Renewable Energy

Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
[2] DeCarolis, J., & LaRose, A. (2023). Annual Energy Outlook 2023. US Energy Information Administration.
[3] Rathnayake, D. B., Akrami, M., Phurailatpam, C., Me, S. P., Hadavi, S., Jayasinghe, G., Zabihi, S. & Bahrani, B. (2021). Grid forming inverter modeling, control, and applications. Ieee Access, 9, 114781-114807.
[4] Aghdam, S. A., & Agamy, M. (2022). Virtual oscillator-based methods for grid-forming inverter control: A review. IET Renewable Power Generation, 16(5), 835-855.
[5] Lu, M., Dutta, S., Purba, V., Dhople, S., & Johnson, B. (2019, September). A grid-compatible virtual oscillator controller: Analysis and design. In 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 2643-2649).
[6] Haimovich, H., & De Battista, H. (2019). Disturbance-tailored super-twisting algorithms: Properties and design framework. Automatica, 101, 318-329.

DESARROLLO DE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES Y ANÁLISIS DE COBERTURA EN EVENTOS GNSS-RO PARA EL USAT-I

Arian Saggese, Javier Smidt

ariansaggese@alu.ing.unlp.edu.ar

SENyT (Sistemas Electrónicos de Navegación y Telecomunicaciones). Departamento de Electrotecnia. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de La Plata

1. Introducción

La radio ocultación (RO) es una técnica de sensado remoto que utiliza la propagación de señales de radio para obtener información sobre el medio a través del cual estas señales se propagan. Particularmente el estudio de nuestra propia atmósfera con base a técnicas de RO se presenta como una alternativa efectiva y desafiante ante los enfoques convencionales en áreas de interés como meteorología [1][2].

En este trabajo se analizará la factibilidad del satélite universitario (USAT-I) como receptor de eventos de RO y a su vez se propondrá un esquema de procesamiento para las señales correspondientes que permitirá obtener los observables de ciencia. El proyecto se enmarca en el contexto del satélite universitario llevado adelante por los grupos SENyT y CTA de nuestra facultad. Dicho proyecto consiste en el diseño y fabricación de un nanosatélite (USAT-I) con formato CubeSat, que entre otros instrumentos llevara un receptor GNSS desarrollado y fabricado en el SENyT. Una de las posibilidades que abre esta implementación es la de analizar el uso de nanosatélites para el sensado remoto de la Tierra, en particular mediante dos técnicas que hacen uso de las señales de satélites GNSS: reflectometría (GNSS-R) y radio ocultación (GNSS-RO).

Para que un evento de RO ocurra es necesario es necesario contar con un sistema de vehículos espaciales capaces de orbitar alrededor de la Tierra, que envíen y reciban señales que en algún momento puedan ser “ocultadas” por dicho cuerpo celeste. Un escenario típico de RO se desarrolla cuando un satélite de órbita media establece comunicación con otro satélite de órbita baja. Bajo la descripción de la mecánica orbital, es de esperar que en la periodicidad de la órbita la señal que recibe el satélite de órbita baja se vea afectada por las capas atmosféricas previo a volverse completamente oculto. Dicho evento permite luego de ser procesado obtener variables atmosféricas inherentes a la señal viajera.

La oportunidad de conformar un esquema de sensado remoto se complementa con la creación del USAT-I ya que cumplirá el rol de satélite de orbita baja. Los satélites de GPS serán los vehículos espaciales de orbita media. A partir de esto se puede idealizar un esquema de factibilidad y recepción de RO.

2. Análisis de factibilidad del USAT-I

Previo al desarrollo de técnicas de procesamiento resulta intuitivo analizar si efectivamente el satélite podría ser utilizado como receptor de eventos de RO. Para llevar acabo este análisis se idearon algunos parámetros de mérito que generen una visión acerca del desempeño del satélite, entre ellos: Cantidad de eventos registrados en un período de tiempo, cantidad de eventos factibles dadas las antenas del USAT-I, durabilidad de los eventos y cobertura global.

El satélite universitario posee una órbita descripta en parámetros Keplerianos, otorgando información del perfil de órbita del USAT-I es decir, su periodicidad, su altitud, su velocidad, etc. Es por ello que los parámetros orbitales influyen la cantidad de eventos registrados. Luego, el satélite posee un arreglo de antenas de las cuales un subconjunto se dedica a la aplicación de RO. Aquellas poseen una característica de patrón tipo visor que apuntan hacia el horizonte en la dirección de movimiento, es por ello que se define la cantidad de eventos factibles debido a que no todo evento registrado es percibido por la antena de satélite [3].

Para evaluar la existencia de un evento de RO, se propone que la distancia mínima (d) de la línea de vista (LOS) entre satélite GPS y USAT-I con respecto al centro de la Tierra debe estar comprendida entre,

$$R_{Tierra} - 200km \leq d \leq R_{Tierra} + 200km$$

el modelo resulta adecuado ya que para dichas altitudes se comprenden las capas atmosféricas que dan sentido al análisis remoto [4].

Para poder evaluar los criterios e índices de mérito se constituyó un simulador de órbita donde se simuló una semana aleatoria de 32 satélites GPS junto con la órbita del USAT-I. La simulación realizada fue de aproximadamente 10 hs con una resolución de un segundo. Se pueden visualizar algunos ejemplos en la Fig. 1.

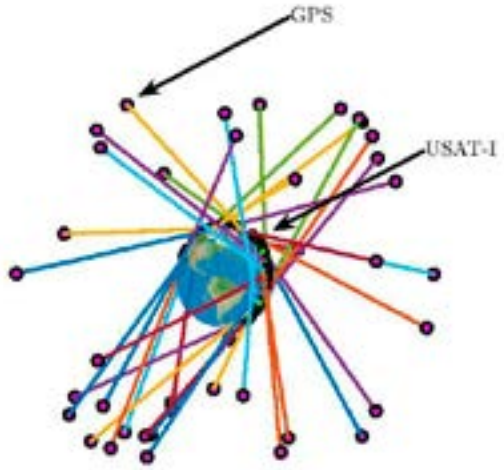


Figura 1. línea de vista entre satélites GPS y USAT-I para algunos eventos simulados.

Se registraron una cantidad de 403 eventos de RO. En el histograma de la Fig. 2 se puede analizar la duración de estas ocultaciones y su tasa de repetibilidad. La cobertura global de estos eventos depende íntegramente de la órbita del USAT-I y la constelación GNSS utilizada (en este caso GPS). La Fig. 3 representa por medio del punto de menor altitud todos los eventos registrados sobre el plano terrestre.

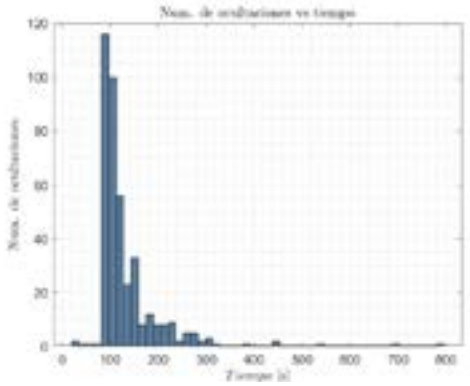


Figura 2. Histograma de eventos y duración.

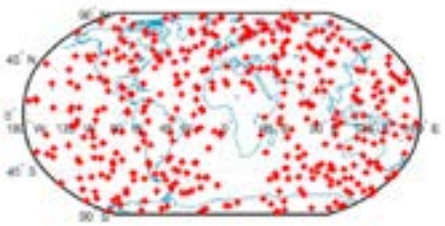


Figura 3. Cobertura Global de eventos para la simulación realizada.

Para poder ver qué evento sería “visible” por el satélite se utilizaron métodos numéricos que modelen el ángulo de arribo del frente de onda de la señal al USAT-I y determinar si el mismo converge al patrón de radiación disponible, entonces allí será un evento que el satélite podrá resolver. Para el análisis se descompone el frente de onda en dos ángulos y se analiza la porción que cae dentro del patrón de radiación, tal como se ilustra en la Fig. 4.

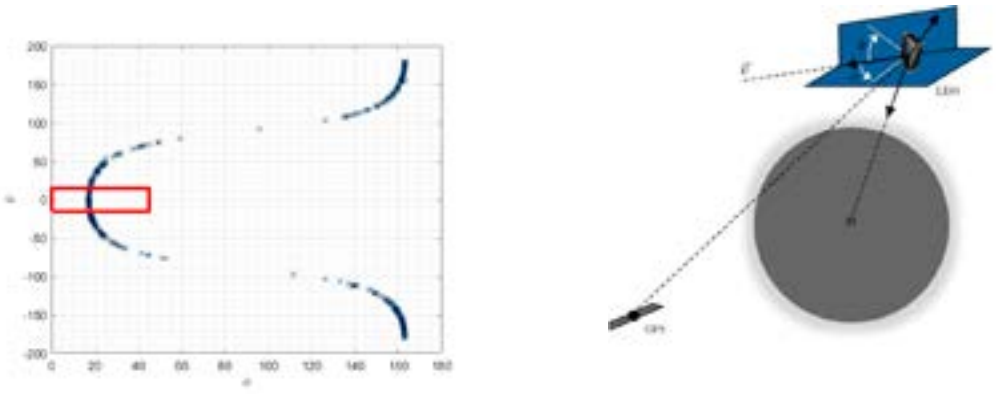


Figura 4. Compatibilidad del ángulo de arribo del frente de onda con el patrón de radiación de la antena.

Las pruebas realizadas concluyen en que el satélite universitario podrá captar alrededor de 43 eventos útiles aproximadamente cada 10 hs. Este número de eventos es significante para el análisis teniendo en cuenta la durabilidad de cada uno de los eventos y el costo computacional de bajar los datos de forma off-line.

3. Simulador de señal con dinámica RO

La validación de un algoritmo de procesamiento de señales requiere, generalmente el uso de muestras reales del evento bajo estudio. En el caso de RO, estos eventos suelen extenderse durante cientos de segundos, con tasa de muestro superiores a los 2 MHz. Este escenario genera volúmenes de datos inmensos, alcanzando miles de millones de muestras que no pueden ser almacenados en receptores convencionales sin una capacidad superlativa.

Esta limitación convierte la obtención de muestras gratuitas para la validación de un desafío significativo. Misiones como COSMIC 1-2, GRACE, SAC- C graban sus productos de eventos de RO pero únicamente ofrecen de forma gratuita datos procesados en niveles superiores (no datos en bruto, o de nivel 0).

Ante esta realidad surge la motivación de desarrollar un simulador de eventos de RO para señales de GPS, específicamente las de L1 C/A. Este simulador está diseñado para describir las órbitas del USAT-I como a su vez la de cualquier otro CubeSat lo que amplía la aplicabilidad a otros escenarios de validación y análisis.

El objetivo del simulador es otorgar una señal de GPS L1 C/A con las características que un evento RO adhiere, esta se presenta recibida en el USAT-I como,

$$S_R(t) = A_{RO}\,c\big(t-\tau(t)\big)\,d\big(t-\tau(t)\big)\,e^{j(2\pi(f_{int}+f_{DG}(t))+\theta_{RO})} + \eta(t)$$

Donde A_{RO} y θ_{RO} ($f_{DE} = \frac{d\theta_{RO}}{dt}$) son la amplitud y la Fase en exceso interpoladas al evento en cuestión, respectivamente, $f_{DG}(t)$ es el Doppler geométrico y $f_{int}(t)$ es la frecuencia intermedia en la cual se recibe la señal en el USAT-I. Los términos c y d representan los códigos de adquisición y de datos para la señal L1, respectivamente, mientras que $\tau(t)$ es el retardo debido a las distancias entre los satélites y su movimiento relativo. $\eta(t)$ es el ruido blanco Gaussiano introducido en el canal de propagación.

El simulador toma como parámetro de entrada un archivo YUMA que contiene efemérides del satélite GPS y del USAT-I. A partir de ello se establece un tiempo de simulación y una resolución temporal para poder modelar el evento. Luego se procede a identificar eventos de RO conjunto al cálculo constante de la posición y velocidad relativa entre satélites, así como

la altitud mínima de la LOS. Con ello podemos calcular los términos relativistas que componen la ecuación de la señal recibida ($f_{DG}(t), \tau(t)$).

Para la generación de los parámetros que son propios del evento RO (A_{RO} , θ_{RO}) se utiliza el método de pantallas de fase (PSM) el cual se basa en segmentar la atmósfera en un plano bidimensional con el objetivo de sumar las contribuciones de fase generadas por cada una de las pantallas atmosféricas [5]. Este método en palabras simples permite estimar la fase en exceso y la degradación en amplitud que una portadora obtiene al atravesar la atmósfera, sus resultados se expresan en función de la LOS registrada. Esto permite realizar una asignación temporal entre el tiempo del evento, la LOS y los parámetros correspondientes. La Fig. 5 muestra para un evento de 100 segundos registrados cómo se obtiene la altura de la LOS h_{LOS}, los parámetros geométricos f_{DG} y los propios del evento A_{RO} (h_{LOS}) y $\theta_{RO}(h_{LOS})$. Por último el termino de ruido para este tipo de aplicaciones ronda los 45 dB, es por ello se adopta dicho valor.

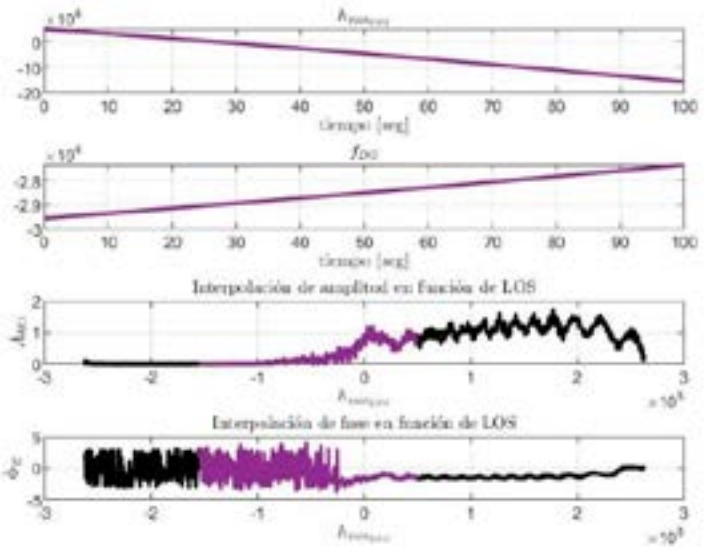


Figura 5. Parámetros simulados de la señal sintética.

4. Procesamiento de señales para RO

Los eventos de RO representan un desafío significativo desde el punto de vista de procesamiento de señales, productos derivados como el Doppler en exceso (FED) son fundamentales para aplicaciones científicas, pero su obtención implica superar varias dificultades técnicas. Durante la aparición de un evento de RO las señales de GPS sufren una degradación sustancial en la relación señal a ruido, acompañada de variaciones abruptas de fase. Estas características imponen limitaciones tanto en el seguimiento como en la demodulación de la señal adquirida. El Doppler en exceso sirve como variable de interés para derivar parámetros atmosféricos tales como presión, humedad y temperatura atmosférica [6].

Para poder extraerlo de la señal durante el evento es necesario establecer lazos de seguimiento que afronten las adversidades que este tipo de eventos presenta. La fase de una señal es el parámetro de interés que debemos estimar, la misma se divide en una fase geométrica debido al movimiento relativo entre satélites y luego la fase en exceso dependiente de la interacción de la atmósfera con la señal, el cambio de esta fase en el tiempo nos da información del FED.

Existen típicamente dos modos de estimar la fase en exceso de la señal de RO. La primera de las técnicas es a lazo abierto basado en modelo y ha sido ampliamente utilizado en los primeros documentos de RO. En este estudio nos basamos en la segunda de las técnicas con implementación de arquitecturas a lazo cerrado donde se estima recursivamente la fase de la señal con base a mediciones y modelado. La documentación con respecto del uso de arquitecturas de lazo cerrado para estimación de fase de portadora en eventos de tipo RO es nula por lo que este estudio reúne suficiente motivación para encontrar resultados interesantes.

Las aceleraciones de fase para RO superan los 2000 rad/s, mucho mayor que el límite teórico de un filtro PLL convencional de 300 rad/s [7]. La arquitectura a lazo cerrado propuesta puede verse en el diagrama de la Fig. 6 cuyo núcleo se basa en un filtro de Kalman formulado para portadoras de GPS L1 C/A.

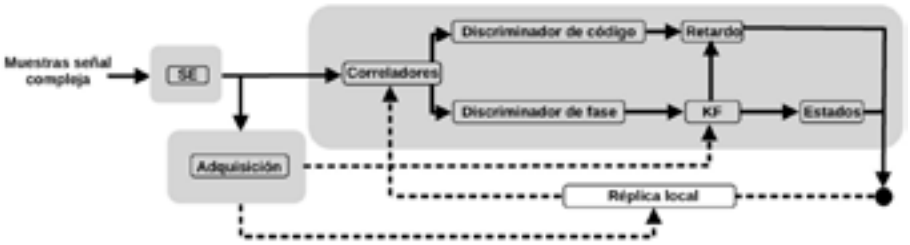


Figura 6. Esquema de sincronismo para portadora GPS-L1 C/A bajo dinámica de RO.

El esquema tiene como entrada las muestras de la señal compleja, por lo que para GPS L1 C/A se debe muestrear a una frecuencia superior a los 2 MHz para evitar aliasing. Inmediatamente las muestras entran a un bloque de “Selección de eventos” (SE) el cual decide si el evento es de tipo creciente o decreciente (es decir, si el satélite USAT-I comienza a aparecer o desaparecer por sobre la LOS). En el caso de ser creciente el evento debe reconstruirse hacia atrás por lo que el bloque realiza la conversión necesaria [8]. Posteriormente se inicializan los adquisidores con un rango de búsqueda de ±40 kHz a una resolución de 50 Hz. Con ello se inicializa la réplica local y por consecuente los correladores con un tiempo de integración de 1 ms, su salida alimenta al discriminador de código y de fase los cuales dan una medida del error en dichas variables.

La estimación del retardo de código es de primer orden con un ancho de banda de 40 Hz, el error se obtiene a la salida de los correladores Early, Prompt y Late.

El filtro de Kalman posee como entrada el error en fase proveniente de un discriminador de arco tangente de 4 cuadrantes, la formulación del filtro se realiza con base a la matriz F y H, matriz de modelo y mediciones respectivamente,

$$F = \begin{pmatrix} 1 & T_s & \frac{T_s^2}{2} \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad H = \begin{pmatrix} 1 & T_s & \frac{T_s^2}{6} \end{pmatrix}$$

Siendo T_s el tiempo de muestreo del sistema. La matriz de covarianza del ruido de mediciones depende de la relación señal a ruido estimada con anticipación y considerada constante $R = \frac{1}{CT_sC/N_0}$. Luego la matriz de covarianza de ruido de modelo Q pondera efectos de dinámicas no modeladas como el oscilador del receptor y su hoja de datos. En la Fig. 7 se puede ver la estimación del Doppler de portadora (Geométrico y exceso por atmósfera) a izquierda, y a

derecha el Doppler en exceso que se obtiene de la resta del geométrico y la estimación obtenida [9].

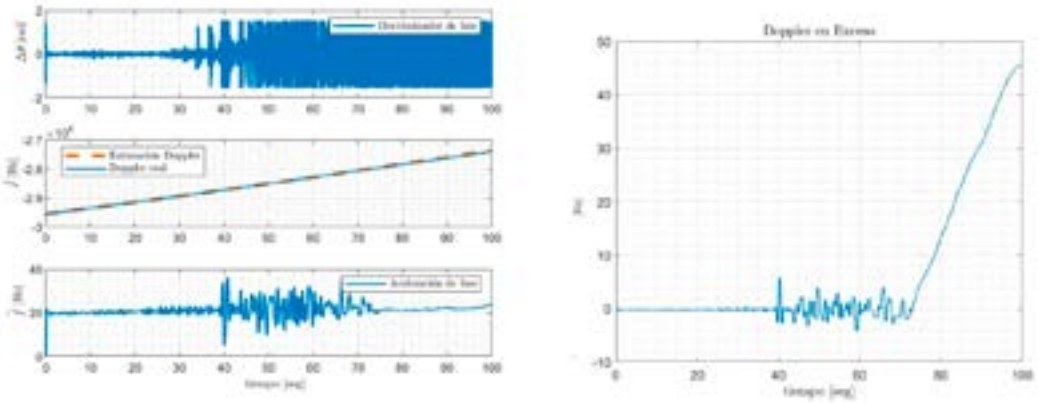


Figura 7. Resultados de estimación para la sincronización de portadora en un evento de RO creciente.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron aportes al procesamiento de señales GNSS bajo eventos de alta dinámica, como la radio ocultación (RO), y se analizó la factibilidad del satélite USAT-I como receptor de estos eventos. A través de simulaciones, se evaluaron las limitaciones de los lazos de seguimiento tradicionales y se exploraron mejoras mediante filtros de Kalman. Además, se desarrolló un método universal para determinar la factibilidad de eventos RO en diferentes órbitas y configuraciones de antenas. A su vez se logró construir un programa que simula la totalidad de un evento de RO teniendo en cuenta los fenómenos atmosféricos. Finalmente, se destaca la importancia de futuras investigaciones con muestras reales para mejorar la precisión de los modelos propuestos y su validación.

Referencias

[1] X. Zou, F. Vandenberghe, B. Wang. A ray-tracing operator. Journal of Geophysical research, 104, September 1999. [3] NASA. Technical report, 2023.

[2] NASA. Weather forecasters whit occult science. Technical report, 2023.

[3] Ezequiel A. Marranghelli, Santiago. Ozafrain, Javier A. Smidt, Mision usat-1. Technical report, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de ingeniería., 2022.

[4] Erin R. Griggs. Analyses for a Modernized GNSS Radio Occultation Receiver. bathesis, Colorado School of Mines, 2015.

[5] Sergey V. Sokolovskiy. Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere. Radio Science, 36(3):441–458, 2001.

[6] E Robert Kursinski. The gps radio occultation concept: Theoretical performance and initial results. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH VOL. 102, 1997.

[7] E. Kaplan and C. Hegarty. Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House mobile communications series. Artech House, 2005.

[8] Saggese Arian. Desarrollo de técnicas de cobertura y procesamiento de señales para estructuras tipo Cube-Sat. Universidad Nacional de La Plata (SEDICI) 2024.

[9] M.S. Grewal and A.P. Andrews. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. IEEE Press. Wiley, 2015.

ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ORIENTADO A APLICACIONES MÓVILES

Graselli, Valentín M.; Torres Alberto, José F.; Gubkien, Benjamín A.; Moré, Jerónimo J.; Puleston, Paul F.; Mancini, Claus N.

GECEP - Instituto LEICI, UNLP-CONICET. Dept. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 (CP 1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: Valentin2110_graselli@hotmail.com

Introducción

El contexto energético global enfrenta una transformación crítica, impulsada por la creciente conciencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y abordar el cambio climático. Este desafío se ve agravado dado que se estima un aumento significativo en la población mundial para el 2050, lo que incrementará aún más la demanda de energía. En Argentina, aproximadamente el 65% de la matriz energética proviene de combustibles fósiles, siendo el sector del transporte el principal consumidor, aportando el 99,67% de la energía necesaria.

El transporte, en particular, es responsable de casi el 30% de las emisiones globales de CO_2, lo que destaca la urgente necesidad de transitar hacia soluciones más sostenibles y eficientes [1][2]. Los Vehículos Eléctricos (VE) han surgido como una alternativa prometedora, no solo por su contribución a la reducción de emisiones sino también por su alto rendimiento energético. Los VE han demostrado un rendimiento superior al 75%, en comparación con el bajo 15% de los vehículos de combustión tradicionales, marcando un hito en la eficiencia energética [3].

Sin embargo no existe una única solución ideal para el almacenamiento de energía en todas las aplicaciones, ya que los diseños disponibles en el mercado suelen dividirse en dos categorías: aquellos diseñados para aplicaciones de potencia, formados para entregar grandes cantidades de energía en cortos períodos de tiempo, y aquellos destinados a aplicaciones con alta densidad energética, que proporcionan una entrega constante de energía durante extensos periodos de tiempo.

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía Híbridos (*HESS*, por sus siglas en inglés) combinan estas soluciones para satisfacer aplicaciones que requieren tanto respuestas rápidas de energía como así también entregas constantes. Si bien existen diversas topologías, las mas aceptadas son aquellas que emplean baterías de litio, solas o en combinación con algún otro módulo de almacenamiento [4]. Cabe destacar que, estos sistemas híbridos pueden compartir la misma electrónica de potencia y hardware de conexión a la carga, reduciendo así los costos iniciales y de mantenimiento.

En este contexto, el trabajo se centra en un sistema híbrido, compuesto por baterías de Ión-Litio (BL) y supercapacitores (SC), tal y como se observa en la Figura 1. Esta combinación estratégica busca aprovechar las fortalezas de ambas tecnologías, superando las limitaciones

individuales. Los SC, con su alta densidad de potencia, y las BL, con su alta densidad de energía, se complementan para proporcionar una solución integral que puede abordar tanto las demandas de potencia producto de una aceleración/desaceleración del vehículo, como así también entregas constantes. Además, mediante la implementación de convertidores electrónicos de potencia bidireccionales, es posible contribuir al aumento de la eficiencia global del sistema utilizando estrategias de frenado regenerativo u otras acciones [5][6].

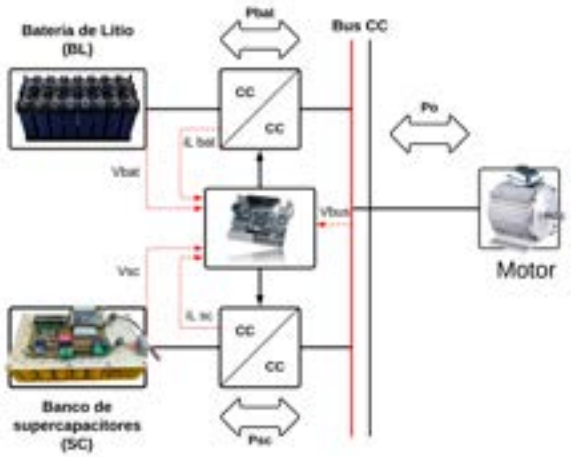


Figura 1: Modelo del control sobre un sistema híbrido de almacenamiento.

El objetivo es proponer una estrategia de control alternativa y compararla con la técnica de control lineal Proporcional-Integral (PI) convencional en términos de rendimiento, estabilidad, respuesta dinámica y robustez ante variaciones en el sistema y condiciones de operación. Esta estrategia de control, que incorpora programación de ganancia, considera las no linealidades inherentes de los convertidores prometiendo un control capaz de mantener un tiempo de establecimiento constante frente a variaciones en la carga. El sistema es controlado digitalmente mediante un micro-computo del tipo Field Programmable Gate Array (FPGA), que permite la implementación de los sistemas de control y adquisición de datos en tiempo real en una computadora.

Parte experimental, resultados y discusión

Como se mencionó previamente, en el presente trabajo se analizan dos técnicas de control aplicadas sobre el convertidor elevador del banco de supercapacitores, cuyo propósito es entregar los picos de potencia necesarios para mantener una tensión constante en el bus de continua. Para ello, se implementó la estrategia de control presentada en la Figura 2, la cuál consta de un lazo interno de corriente controlado por un PI, anidado dentro de un lazo externo de tensión que también es controlado por un controlador PI en su primera etapa. La elección de este controlador en lugar de un control PID, se sustenta en que la inclusión del término derivativo en el control amplifica de manera no deseada el rizado provocado por la conmutación de las llaves en las variables de estado controladas del convertidor CC/CC, lo que podría resultar en oscilaciones indeseables en el sistema de control.

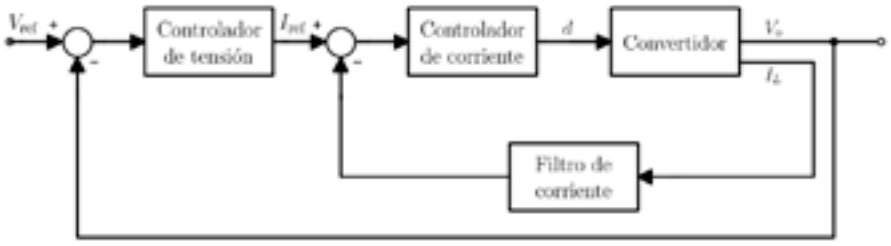


Figura 2: Estrategia de control sobre el convertidor CC/CC.

Sin embargo, en una segunda etapa se implementó la técnica de *Gain Scheduling* para el lazo externo de tensión. Este enfoque utiliza la corriente del inductor como variable observable para identificar la región operativa actual del sistema lo que permite seleccionar el controlador lineal más adecuado para cada región específica.

En este trabajo en particular, se dividió la planta en cinco regiones operativas de igual tamaño para su linealización. Cada región cubre un rango de 3A, donde se linealizó la planta para cada valor de corriente indicado en la Tabla 1, permitiendo la posterior sintonización de cada controlador PI.

Tabla 1: División de las regiones para aplicar GS.

Región	***Corriente***	***Resistencia Media***
1	1,5A	64Ω
2	4,5A	21,33Ω
3	7,5A	12,8Ω
4	10,5A	9,14Ω
5	13,5A	7,11Ω

Una vez sintonizados los respectivos PIs con el objetivo de garantizar una respuesta rápida que rechace eficazmente las perturbaciones y mantener un tiempo de establecimiento consistente en todas las regiones de operación. Se interpolaron las constantes proporcional (Kp) e integral (Ki) obtenidas, mediante un polinomio de segundo grado (Figura 3). Esta aproximación asegura la ausencia de discontinuidades entre los cambios de controlador, lo que a su vez respalda la estabilidad del sistema. De esta manera, el controlador de tensión verifica por medio de la corriente del inductor en que región esta operando y aplica las ganancias correspondientes.

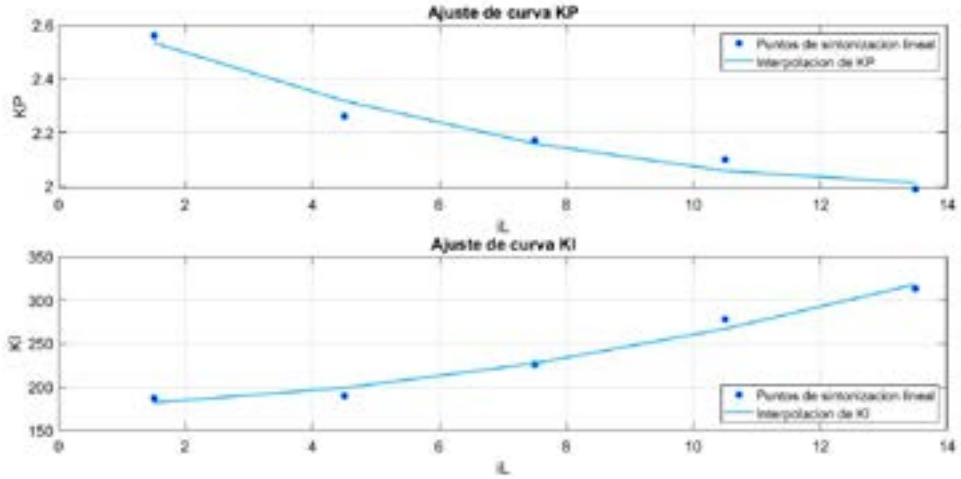


Figura 3: Comparación de interpolación vs puntos obtenidos

Con el objetivo de comparar ambas estrategias, se realizaron las siguientes simulaciones. En primer lugar, se utilizó el controlador PI sintonizado en la zona I, y se aplicaron variaciones en la carga considerando los escenarios más desfavorables posibles para evaluar el comportamiento del sistema en condiciones extremas. En este sentido, se varia la resistencia

de carga desde un valor 64Ω (región I) hasta un valor 7,11Ω (región V) en t=0,3 segundos, reflejando así la perturbación más significativa que podría afectar al sistema. Posteriormente, en t=0,4 segundos, la resistencia se ajusta a un valor de 21,33Ω (región II), luego a 9,14Ω (región IV) en t=0,5 segundos y finalmente a 12,8Ω (región III) en t=0,6 segundos.

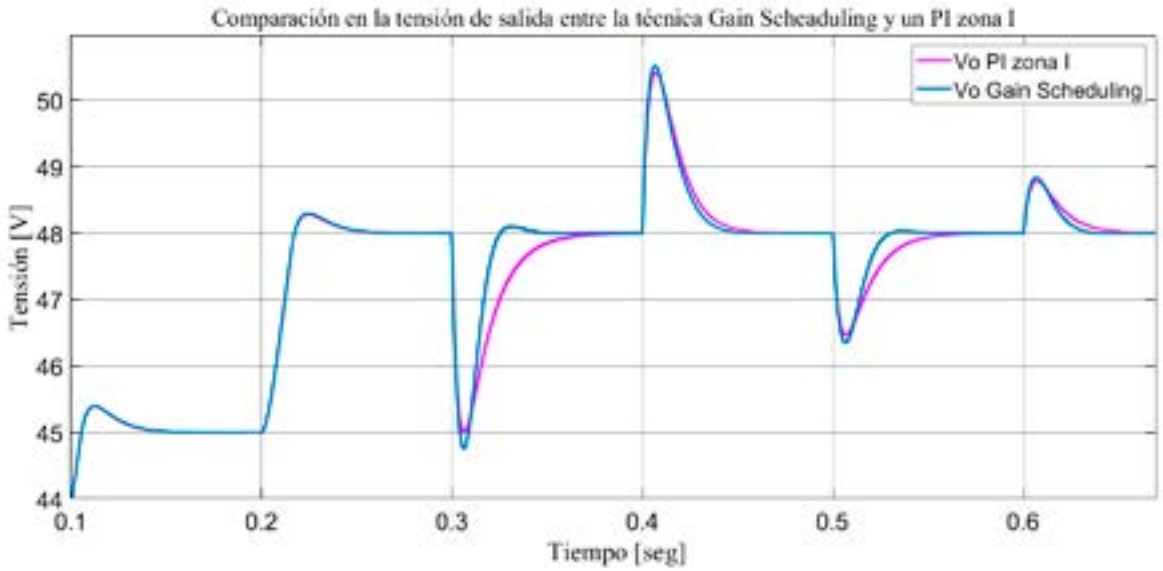


Figura 4: Comparación de la tensión en la salida del convertidor entre el GS y la zona I.

La Figura 4 ilustra la comparación del GS con un PI sintonizado en la zona I, es decir para una corriente por el inductor de 1,5A. En este caso, se aprecia la misma dinámica en dicha zona ya que esta actuando el mismo PI en el GS. A medida que se realizan variaciones en la carga, se evidencia que el GS presenta una respuesta más rápida en comparación con el PI convencional, debido a que este último está sintonizado en una región de menor exigencia, lo que conlleva a una mayor presencia de sobrepicos de corriente. No obstante, incluso ante una perturbación de cinco regiones, la corriente se mantiene dentro de los límites manejados por el convertidor.

También se realizó una simulación comparativa entre el GS y un controlador PI sintonizado en la zona V, correspondiente a una corriente del inductor de 13,5A. En las zonas de corrientes más exigentes, se observó que ambos métodos presentaron una dinámica similar, ya que en el GS se utilizó el mismo controlador PI. Sin embargo, en las zonas de corrientes menos exigentes, el GS mostró una respuesta más lenta al rechazo de perturbaciones en comparación con el PI sintonizado de manera fija, ya que este último actúa con un control más brusco debido a su sintonización en una zona de mayor exigencia. Esto resulta en una respuesta subamortiguada mientras que el GS permite mantener la consistencia en los tiempos de establecimiento, mejorando la estabilidad del sistema en todas las regiones.

Finalmente se realizo la evaluación experimental de ambas técnicas de control. Aunque el enfoque del proyecto se centra en el uso de baterías de litio, todos los ensayos se realizaron utilizando una fuente de potencia que emula el comportamiento de las baterías. Esta decisión se tomó por consideraciones de seguridad tanto para la electrónica utilizada como para los usuarios. Dado que la estación de ensayo experimental aún no cuenta con los elementos de seguridad necesarios para trabajar con baterías, la fuente de potencia ya incorpora algunas medidas de seguridad, como la limitación de corriente.

Por motivos de extensión del trabajo no se comentarán en detalle los ensayos previos

realizados y se discutirá directamente la prueba del lazo de tensión externo. Donde inicialmente se realiza un escalón de carga de 12,8Ω a 64Ω que implica un escalón de corriente en la entrada del convertidor de 7,5A a 1,5A. Si bien, en teoría estaría actuando el mismo PI en la primera región, el hecho de aplicar la interpolación de ganancia implica que los parámetros del controlador no serán exactamente los mismos, esto se debe a que al implementar la curva de interpolación de segundo orden (Figura 3), aparece un error mínimo con los parámetros sintonizados modificando la respuesta del control. De esta manera, se espera un comportamiento ligeramente diferente pero favorable (más rápido), el cuál se ve reflejado en la Figura 5.

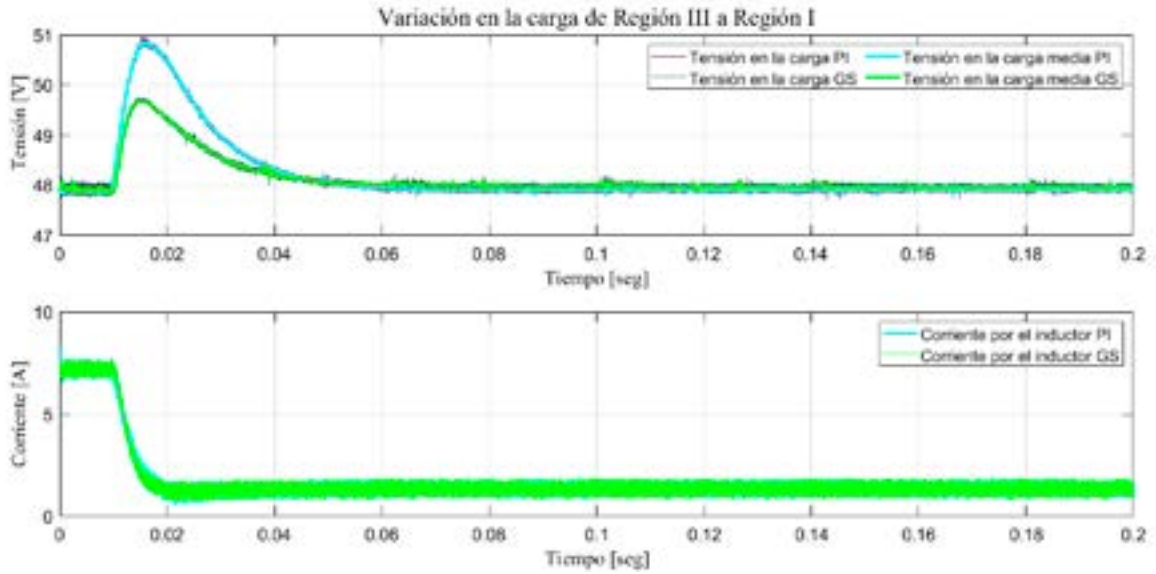


Figura 5: Variación en la carga de 12,8Ω a 64Ω

Posteriormente, se invierte el escalón de carga de 64Ω (región I) a 12.8Ω (región III). Como se esta actuando en una zona distinta a la sintonizada por el PI fijo, se espera una mejor respuesta por parte de la planificación de ganancias. En la Figura 6 se grafican ambos rechazos y se aprecia la mejora esperada validando el desarrollo realizado.

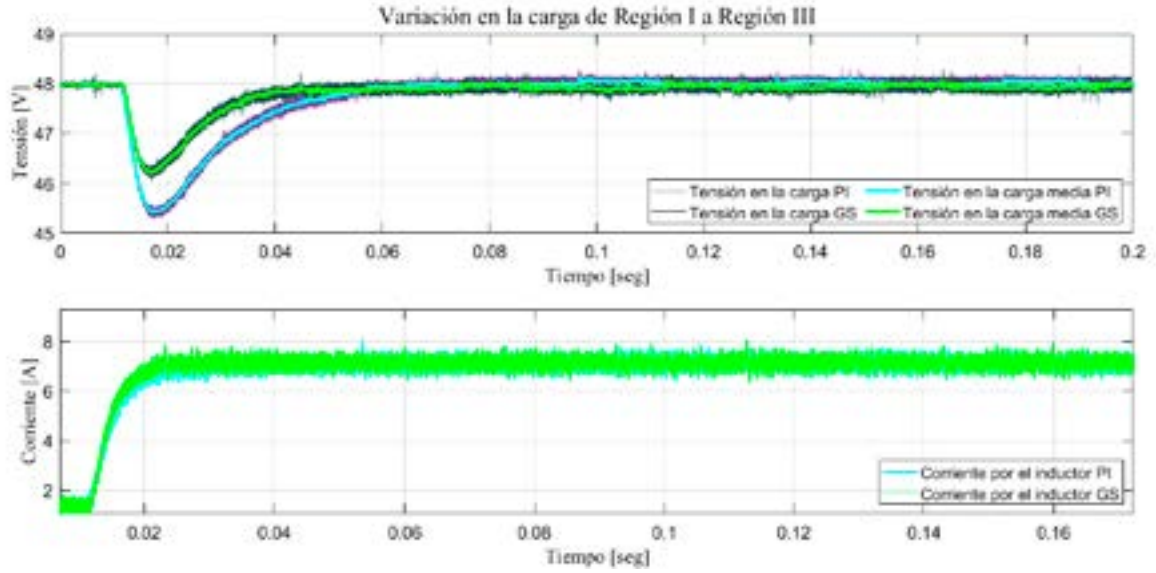


Figura 6: Variación en la carga de 64Ω a 12,8Ω

Conclusiones

Este desarrollo ha demostrado que la técnica GS posee la capacidad de mantener un tiempo de establecimiento constante frente a diversos modos de operación, destacando su eficacia para rechazar distintas perturbaciones en comparación con un controlador PI convencional. Estos resultados subrayan la importancia de desarrollar controladores que tienen en cuenta las no linealidades del sistema, especialmente en el contexto de sistemas híbridos con aplicaciones móviles.

Sin embargo, este proyecto no solo confirma la eficiencia de la técnica GS, sino que también abre nuevas puertas para la exploración de técnicas de control aún más sofisticadas, como el *sliding mode control*, que prometen ofrecer un rendimiento aún más robusto y adaptable ante diversas condiciones y perturbaciones. Asimismo, se plantea la posibilidad de llevar a cabo experimentos que integren ambos sistemas de almacenamiento con las correspondientes medidas de seguridad.

En definitiva, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones en el campo del control de sistemas híbridos, ofreciendo no solo una comprensión más profunda de las técnicas de control, sino también la mejora continua en la eficiencia y la fiabilidad de estos sistemas en aplicaciones móviles y más allá.

Bibliografía

[1] “World Energy Outlook”, 2022.

[2] “Global coal demand expected to decline in coming years”, 2023.

[3] “Global ev outlook 2019”, 2019.

[4] M.A. Hannan, F.A. Azidin, A. Mohamed, “Hybrid electric vehicles and their challenges”, 2013.

[5] Bo Long and Shin Teak Lim and Zhi Feng Bai and Ji Hyoung Ryu and Kil To Chong, “Energy Management and Control of Electric Vehicles, Using Hybrid Power Source in Regenerative Braking Operation”, 2014.

[6] M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, “Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries”, 2010.

SISTEMAS DE CONTROL PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA OCEÁNICA EN PRESAS DE MAREA

Barrios, Leonardo A.; Anderson, Jorge L.; Puleston, Paul F.

GECEP, Instituto LEICI, UNLP-CONICET. Dept. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 (CP 1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
e-mail: leonardobarrios55@gmail.com

Introducción

La caracterización del torque y el control de velocidad de las turbinas de tipo Kaplan axial, también llamadas bulbo, son fundamentales para su aplicación en represas de mareas, donde la energía se extrae a partir de la diferencia entre la marea alta y baja. Cuanto mayor sea esta variación, mayor será la energía disponible para la generación. Estas turbinas cuentan con un conjunto de curvas características, conocido como Hill Chart, que describe su rendimiento en función de los ángulos de los álabes móviles y el ángulo de ataque de las palas, la velocidad de rotación, la diferencia de altura de la presa y el flujo a través de ella.

En este contexto, este trabajo desarrolla un estudio detallado sobre las características de las turbinas bulbo utilizando un Hill Chart, lo que permitirá comprender su comportamiento en distintas condiciones de operación. A partir de este análisis, se diseña un sistema de control para la turbina bajo estudio, con dos objetivos principales. Por un lado, optimizar la extracción de energía ajustando los parámetros de la turbina para maximizar la potencia generada en función de la variación de la marea, generando una velocidad de referencia óptima. Por otro lado, se implementa un esquema de control que permite seguir una referencia específica de caudal o velocidad, lo cual resulta fundamental en aplicaciones donde se requiere mantener un flujo regulado. Para finalizar, se realizaron algunos ensayos por simulación para evaluar el modelo y la eficiencia del controlador implementado.

Generación mediante represas de mareas

Las represas por mareas, o *tidal barrages*, son un tipo de planta de energía mareomotriz que aprovecha la diferencia de nivel entre la marea alta y la marea baja para generar electricidad. Funcionan de manera similar a las centrales hidroeléctricas convencionales, pero en lugar de un río, utilizan el agua del mar y las variaciones del nivel de la marea. Para ello, se construye una represa en la desembocadura de un estuario o bahía con una diferencia significativa entre la marea alta y la marea baja. En esta estructura se instalan turbinas, generalmente de tipo bulbo o Straflo, que son adecuadas para operar con flujos bidireccionales.

El funcionamiento de una represa mareomotriz puede darse en diferentes modos. En el esquema más simple, conocido como generación en un solo sentido, se cierran las compuertas cuando la marea sube y se espera a que se genere una diferencia de altura suficiente entre ambos lados de la represa. Luego, el agua es liberada desde el embalse hacia el mar, pasando por las turbinas y generando electricidad. Otra opción es la generación en dos direcciones, donde el agua fluye tanto durante la bajamar como durante la pleamar, permitiendo generar energía en ambos sentidos. Aunque este modo reduce ligeramente el rendimiento de las turbinas, permite extender los períodos de generación. Además, en algunas instalaciones se emplea el bombeo asistido, en el que las turbinas funcionan temporalmente como bombas para aumentar la diferencia de nivel entre la marea y el embalse, optimizando la producción de energía en la siguiente fase.

Un ejemplo emblemático de este tipo de plantas es la Central Mareomotriz de La Rance, en Francia, que cuenta con 24 turbinas bulbo de 10 MW cada una y opera en modo bidireccional con bombeo asistido [1]. Este tipo de tecnología presenta varias ventajas,

como el hecho de ser una fuente de energía renovable y predecible, ya que las mareas siguen ciclos regulares. Además, las represas mareomotrices tienen una vida útil prolongada y pueden ofrecer beneficios adicionales, como control de inundaciones y apoyo a la navegación. Para entender el sistema por completo, a continuación se analizan las bases de la generación hidroeléctrica. En la Figura 1 se puede ver un esquema de una represa por marea.

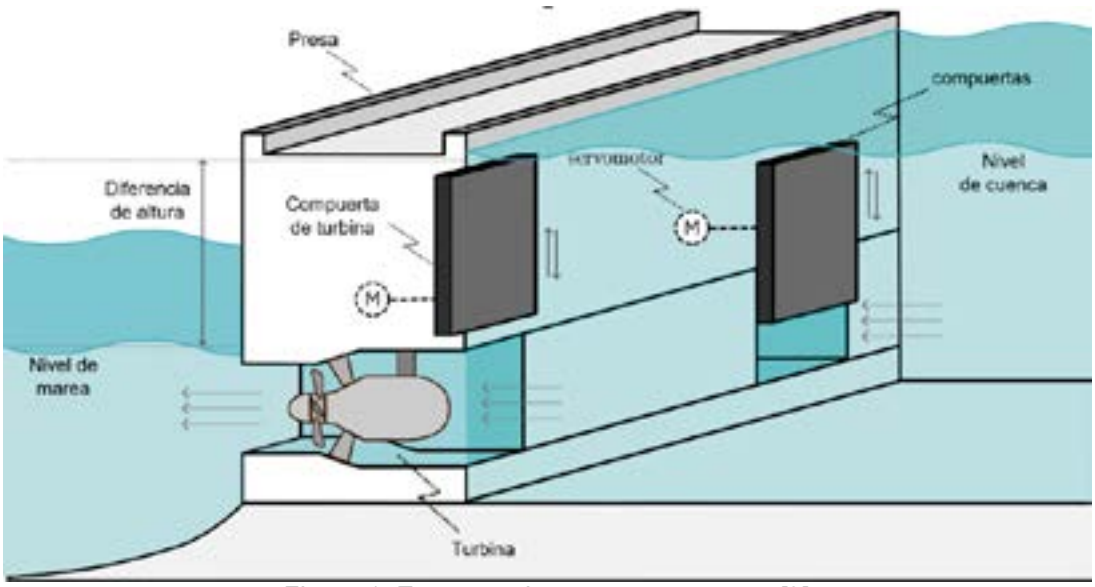


Figura 1: Esquema de represa por marea [2].

A partir de la diferencia de alturas entre los niveles de agua dentro y fuera del reservorio o cuenca, se extrae su energía potencial. Esta energía es capturada por las turbinas, a través de las cuales fluye un determinado caudal, con períodos de aproximadamente 12 horas, correspondientes al ciclo natural de las mareas en cada ubicación. En estas turbinas, los álabes y las palas se ajustan para regular el caudal deseado, lo que a su vez determina el rendimiento en función de la velocidad a la que el generador esté controlado.

A continuación, se presentan las ecuaciones básicas que permiten comprender el proceso de extracción de la energía hidráulica [3]. Partiendo de la ecuación de Bernoulli para un punto arbitrario 0, la altura piezométrica en metros se define como:

$$H_0 = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la constante gravitatoria, p_0, V_0 y Z_0 son, la presión estática, la velocidad media, y la elevación en el punto 0 respectivamente.

La altura bruta (H_b) se define como la diferencia entre la altura piezométrica del embalse (H_1) y la altura de la descarga (H_2) en una central hidroeléctrica.

$$H_b = H_1 - H_2 = \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2\right)$$

Dado que el agua que fluye a través de los conductos desde el lado de entrada de la turbina y desde la salida del tubo de aspiración hasta el agua de cola genera algunas pérdidas de carga, ΔH_{loss}, la altura efectiva, o altura neta, disponible para la turbina está dada por:

$$H_n = H_b - \Delta H_{loss}$$

Considerando la energía específica disponible, o la energía específica neta, en J/kg:

$$E_n = g\,H_n$$

la potencia neta de las turbinas en la central eléctrica en Watts, P_h (potencia hidráulica), es igual al producto entre esta energía específica neta y el flujo másico que pasa a través de la turbina, es decir:

$$P_h = \rho\,Q\,E_n = \rho\,g\,Q\,H_n$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la constante gravitatoria y Q es el caudal que pasa por la turbina. Sin embargo, debido a diversas pérdidas, como la fricción interna, las fugas y las ineficiencias mecánicas, solo una parte de esta potencia se transfiere al eje de la turbina. La potencia interna en el rodete, P_t, se expresa en términos del torque (T_t) y la velocidad de rotación (Ω):

$$P_t = \eta\,P_h = \Omega\,T_t$$

La eficiencia de la turbina, η, se calcula como la relación entre la potencia mecánica de la turbina y la potencia neta hidráulica:

$$\eta = \frac{P_t}{P_h}$$

Este rendimiento se caracteriza por los fabricantes de las turbinas mediante una gráfico llamado *Hill chart* (o diagrama de colinas). Este diagrama representa el rendimiento de la turbina en función de 2 parámetros claves, caudal específico (Q_{11}) y la velocidad específica (n_{11}), los cuales también deben ser ajustados junto con el ángulo de palas y álabes para obtener un desempeño óptimo. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del Hill Chart para una turbina de tipo Kaplan-Bulbo.

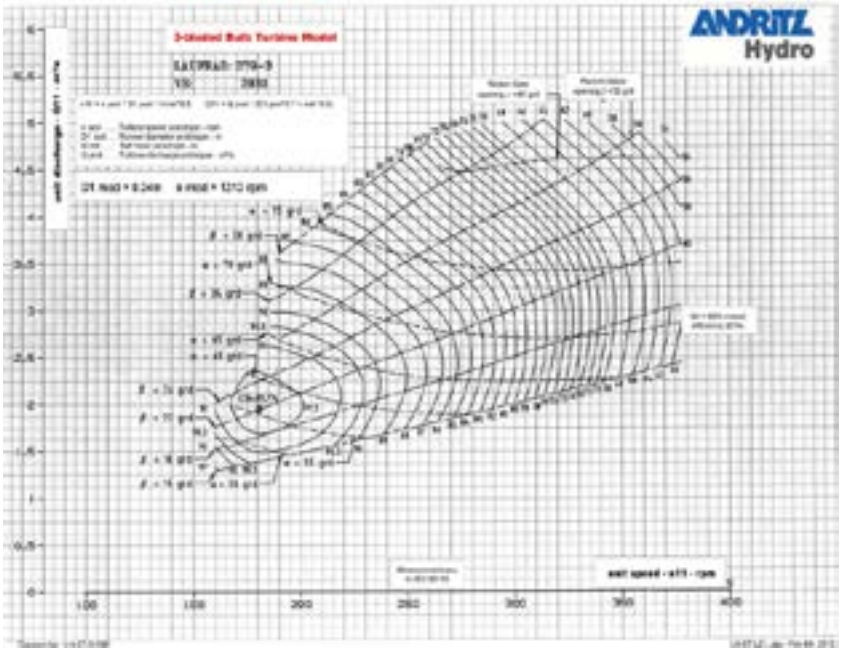


Figura 2: Hill Chart de la turbina kaplan-bulbo utilizada.

Por definición el caudal específico y la velocidad específica son:

$$n_{11}=\frac{nD}{\sqrt{H_n}}, Q_{11}=\frac{Q}{D^2\sqrt{H_n}}$$

donde n es la velocidad real de la turbina en rpm, D es el diámetro de la turbina, y Q es el caudal real en m^3/s. El índice $(.)_{11}$ se refiere a una turbina geométricamente idéntica, pero con un diámetro de 1 m y que opera con una altura neta de 1 m.

A partir de las ecuaciones vistas se puede obtener la potencia y el torque entregados por la turbina, desnormalizando el Hill chart:

$$P_t=\rho g D^2 Q_{11}(n11,\beta)\eta(n11,\beta)(\sqrt{H})^3$$

$$T_t=\rho g D^3 \frac{60}{2\pi}\frac{Q_{11}(n11,\beta)\eta(n11,\beta)}{n11}(\sqrt{H})^2$$

donde β es el ángulo de ataque, o de pitch, de las palas.

Normalmente en las represas de ríos las turbinas hidroeléctricas se hacen trabajar con velocidad constante mediante un generador sincrónico, con una determinada cantidad de polos para no hacer uso de una caja de engranajes, y se utilizan los álabes para el control del flujo y de potencia de extracción. La principal razón de tener la velocidad fija es que este tipo de generación se utiliza como generación de fondo junto con la generación nuclear, por lo que son las principales encargadas de mantener la frecuencia de red correcta.

En este caso, donde la diferencia de alturas varía mucho respecto a las represas de ríos, es mejor trabajar con la turbina a velocidad variable para determinar el flujo deseado, y la potencia deseada. Este tipo de regulación también se denomina de triple regulación, donde se varían los ángulos de pitch, ángulos de álabes, y la velocidad de rotación.

Para simplificar el problema, se obtuvieron los datos del Hill chart y se consideró que la turbina opera con palas fijas con un ángulo de palas de $\beta=22°$. Se realizó un ajuste con los datos obtenidos de la gráfica, asumiendo que el caudal Q_{11} y la velocidad n_{11} dependen linealmente entre sí para el ángulo elegido. Por otro lado, el rendimiento se ajustó a un polinomio del grado que fuera necesario, como se puede ver en las Figuras 3 y 4.

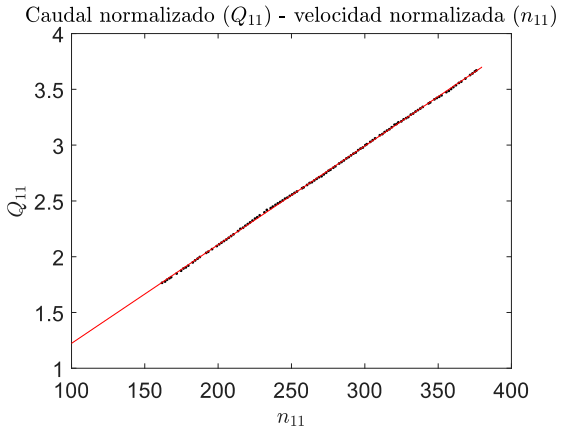


Figura 3: Caudal específico - velocidad específica.

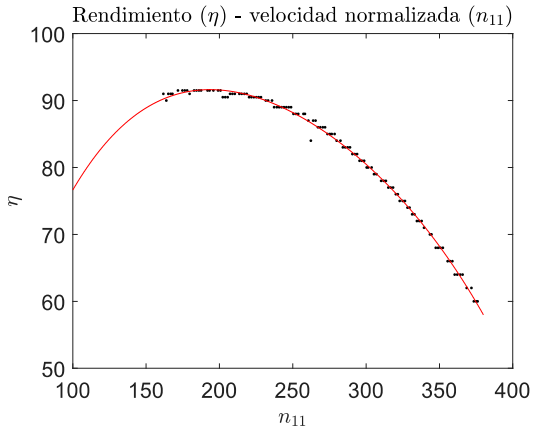


Figura 4: Rendimiento - velocidad específica.

Diseño del sistema de control para la optimización del sistema

A partir de las ecuaciones de potencia y torque de las turbinas, y teniendo en cuenta un ángulo de pitch β fijo (con $\beta=22°$), se obtienen las curvas características potencia-velocidad, y torque-velocidad. Estas gráficas se pueden ver en las Figuras 5 y 6.

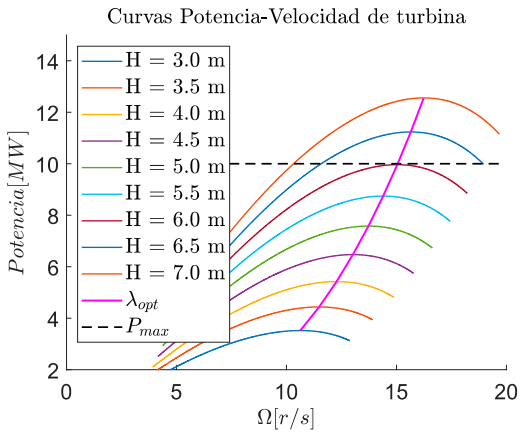


Figura 5: Curvas Potencia-Velocidad de la turbina bulbo.

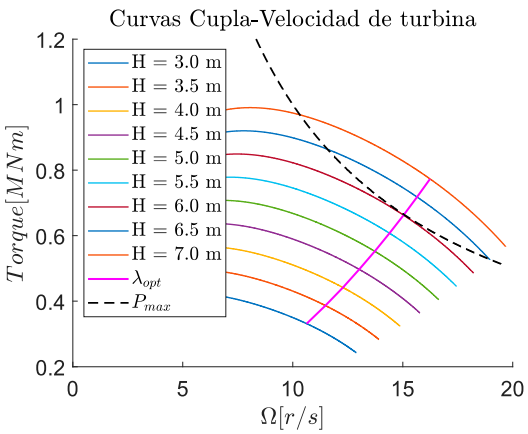


Figura 6: Curvas Torque-Velocidad de la turbina bulbo.

A partir de estas curvas, se diseña un control de velocidad empleando el torque del generador como variable de control, el cual está acoplado directamente al eje de la turbina. El sistema completo, en su versión simplificada, se modela considerando una masa inercial que engloba tanto la inercia propia de la turbina como la del generador. Además, se incluyen el torque producido por la turbina y el torque resistente del generador, a través del cual se extrae la energía mecánica:

$$J_{total}\dot{\Omega} = T_t - T_g$$

donde J_{total} es la inercia total del sistema, T_t es el torque que impone la turbina y T_g es el torque de freno del generador. Para este análisis se considera que se puede controlar el torque T_g con un tiempo de respuesta significativamente más rápido que la dinámica del sistema, por lo que se considera directamente como la variable de control.

Como primer control para entender el sistema se diseñó un PI mediante la linealización del comportamiento de T_t alrededor de los puntos de estabilidad, obteniendo el sistema linealizado:

$$\dot{\Omega} = A\,\Omega + B\,T_g$$
$$y = \Omega$$

Con el sistema caracterizado se diseña el control PI para que responda lo suficientemente rápido con respecto a los cambios de mareas (alrededor de horas), teniendo una velocidad de respuesta al escalón de 35 segundos.

Para lograr la máxima extracción de energía para una altura neta H_n dada, se calcula a partir de esta la velocidad de referencia, teniendo en cuenta la velocidad normalizada n_{11} a la cual se consigue la máxima extracción de potencia:

$$\Omega_{ref} = \frac{\sqrt{H}\, n_{11maxP}\, 2\pi}{D\, 60}$$

Por otro lado, sería posible establecer cualquier velocidad de referencia dentro de los rangos operativos reales, siempre que se cuente con un control supervisor que proporcione al controlador diseñado las referencias adecuadas. De este modo, no solo se puede definir una velocidad de referencia arbitraria, sino también un caudal específico según las necesidades del sistema. El control supervisor es responsable de gestionar la diferencia de niveles, regulando tanto el caudal que fluye a través de las compuertas como el que atraviesa las turbinas, con el objetivo de maximizar la extracción de energía durante los ciclos de marea.

Resultados

En la figura 7 se observa la respuesta temporal al cambio de altura neta de $H=4$ a $H=5$, lo que implica un cambio de velocidad de rotación dada por la ecuación anterior. El resultado obtenido es el esperado, donde se puede ver que la potencia extraída del sistema aumenta con la diferencia de altura neta, de modo que la turbina trabaja en el punto de máxima extracción de potencia.

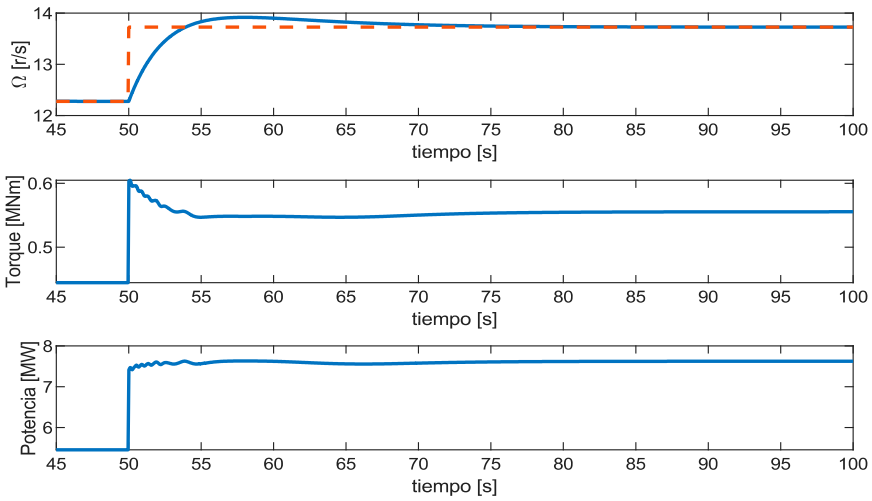


Figura 7: Resultado de simulación del modelo con PI sintonizado.

Conclusión

En este trabajo se realizó un estudio detallado sobre el funcionamiento y modelado de un sistema de generación hidroeléctrico basado en turbinas bulbo, analizando su comportamiento a partir del Hill Chart y diseñando estrategias de control para optimizar su desempeño. Se demostró que el sistema está correctamente caracterizado mediante curvas que describen con precisión la relación entre las variables operativas y el rendimiento de la turbina.

Uno de los principales aportes de este estudio es la implementación de un control de velocidad variable, una estrategia que, aunque no es ampliamente utilizada en el ámbito hidroeléctrico, presenta ventajas significativas en términos de eficiencia y adaptabilidad. La capacidad de ajustar dinámicamente la velocidad de rotación según las condiciones de operación permite mejorar el aprovechamiento energético y explorar nuevos enfoques para la regulación de estas turbinas en distintos escenarios.

Además, el modelado detallado y la estrategia de control desarrollada sientan las bases para la integración de un control supervisor, cuyo objetivo será la generación de referencias óptimas de caudal o velocidad de rotación. Esto permitirá una regulación más precisa del sistema, maximizando la extracción de energía y garantizando un desempeño estable y confiable bajo diferentes condiciones operativas.

Referencias

[1] Charlier, R. H. (2007). Forty candles for the Rance River TPP tides provide renewable and sustainable power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(9), 2032-2057.

[2] Skiarski, A., Faedo, N., & Ringwood, J. V. (2024). Optimisation and control of tidal range power plants operation: Is there scope for further improvement?. Energy Conversion and Management: X, 100657.

[3] de Véras Sousa, P. H. D. (2021). Application of Artificial Neural Networks to the study of hydraulic turbine draft tubes (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes [2020-....]).

[4] Aggidis, G. A., & Feather, O. (2012). Tidal range turbines and generation on the Solway Firth. Renewable energy, 43, 9-17.

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES PARA CUBESATS

Lombardozzo Simón M., Marranghelli Ezequiel A., López La Valle Ramón G., Catellani Agustín, Rodríguez Santiago, Nuñez Francisco A., Galván Julián, Moran Fabra Ruben D.

UIDET-SENyT - Sistemas Electrónicos para Navegación y Telecomunicaciones
Dto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería (UNLP)
Calle 48 y 116 - (1900) La Plata, Bs. As.
ezequielmarranghelli@ing.unlp.edu.ar

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones en misiones satelitales permiten establecer un enlace con estaciones terrestres para la transferencia de datos de telemetría, seguimiento y comando (TT&C), así como para descargar los datos generados por la carga útil. El auge de los CubeSats ha aumentado la demanda de subsistemas de bajo costo, incluido el de comunicaciones. Se han propuesto muchas arquitecturas para diferentes aplicaciones y requisitos [1].
Este trabajo se centra en la implementación y validación del sistema de comunicaciones diseñado para el satélite USAT-I, que es un CubeSat 3U (específicamente $10\,\text{cm}\times10\,\text{cm}\times32.6\,\text{cm}$) con capacidades experimentales de teledetección. USAT-I es el primer satélite en desarrollo por la UNLP en el marco del Programa Satelital Universitario [2]. El proyecto lo coordina el Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), y el grupo Sistemas Electrónicos de Navegación y Telecomunicaciones (SENyT) es responsable del desarrollo de los subsistemas electrónicos. La carga útil principal del USAT-I es un receptor GNSS (Global Navigation Satellite Systems) de desarrollo propio capaz de obtener señales GNSS directas útiles para la navegación, señales refractadas en la atmósfera terrestre mediante la técnica de radioocultación (GNSS-RO), y también señales reflejadas en la superficie terrestre mediante la técnica de reflectometría (GNSS-R). Estas aplicaciones ya se han implementado mediante satélites complejos y costosos, pero por el momento sólo hay unos pocos desarrollos con nanosatélites [3]–[7]. El satélite se situará en una órbita baja (LEO) a una altitud de unos $600\,\text{km}$, por lo que completa una órbita en unos 90 minutos. En estas condiciones, la visibilidad desde la estación terrestre es de tan solo 3 minutos. Su lanzamiento está previsto para mediados de año de 2025.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

En la Fig. 1 se presenta un esquema general del enlace de datos propuesto basado en un estudio exhaustivo del estado del arte y diversas misiones de CubeSats universitarios. Para el proyecto USAT-I, se desarrolló un sistema de comunicaciones compatible con el estándar y basado en componentes comerciales de bajo costo. El análisis de factibilidad y el diseño propuesto para el transceptor y las antenas asociadas se presentaron en [8]–[10]. El sistema permite establecer dos enlaces independientes con la estación terrestre, cada uno con diferentes objetivos y requisitos.



Fig. 1: Enlace de comunicación satelital.

El enlace UHF (centrado en 435.2 MHz) está destinado al flujo de datos de TT&C utilizando una antena cuasi-isotrópica para garantizar una buena visibilidad independientemente de la orientación del satélite. El enlace de banda S (centrado en 2.425 GHz) permite una tasa de transferencia de datos más alta, por lo que se destina para descargar los datos de la carga útil. El mismo utiliza una antena de parche único, que es más direccional y por lo tanto posee mayor ganancia, pero requiere estabilizar primero la orientación del satélite. Las principales especificaciones del sistema se resumen en la Tabla I.

Parámetros \ enlace	Banda UHF	Banda S
Frecuencia central	435.2 MHz	2425 MHz
Modulación	2-GFSK	2-GFSK
Corrección de errores (FEC)	Convolucional r =1/2, L =4	Convolucional r =1/2, L =4
Data whitening	Sí	Sí
Direccionalidad	Subida/Bajada	Bajada
Tasa de datos máxima	1200 kbps	500 kbps
Tasa de datos definida	9.6 / 1.2 kbps	250 kbps
Antena	Omnidireccional	Hemisferica
Potencia de salida	1 W (máx.)	1 W (máx.)

Tabla I: Especificaciones del Sistema de Comunicaciones.

III. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ANTENAS

A. Antena de banda UHF

La antena destinada para TT&C está diseñada para operar en banda UHF y es de tipo *turnstile* porque presenta características muy convenientes para esta aplicación. En primer lugar, permite ser plegada, puede adaptarse para obtener polarización circular, y su patrón de radiación (RP) es cuasi-isotrópico dentro del rango de frecuencia de interés. Además, la fabricación de los elementos radiantes es relativamente simple y poco costosa ya que puede realizarse con cuatro cintas métricas comerciales. Las mismas no solo pueden doblarse y apoyarse sobre la estructura del CubeSat, sino que al soltarse recuperan su forma original. De esta manera, al estar plegadas su volumen es prácticamente despreciable hasta el momento del despliegue, y esto ocurre luego de que el satélite haya sido puesto en órbita. En cuanto al sistema de retención de las cintas, se realiza con hilos de nailon que se queman de manera controlada mediante la generación de calor por efecto Joule.

Además de las tiras de cinta métrica (elementos radiantes), la antena incluye un circuito impreso que contiene la red de alimentación de RF, una base FR4 para rigidez y soportes de acetal en forma de rampas para dar la inclinación correcta a cada cinta. La red de alimentación consta de tres divisores Wilkinson interconectados entre sí para proporcionar cuatro salidas desfasadas secuencialmente a $90°$ para lograr la polarización circular [10]. El diseño se implementó en un sustrato RO3010 con una constante dieléctrica nominal de 10.2, lo que permite una reducción en el área del circuito. Cabe señalar que inicialmente se realizaron simulaciones electromagnéticas para verificar el diseño y se fabricaron versiones preliminares para calibración. La antena UHF desarrollada y su ubicación en la maqueta USAT-I se muestra en la Fig. 2.

Los parámetros de dispersión simulados y medidos S_{11} de la antena UHF se presentan en la Fig. 3 para su comparación. En ella se puede ver que coinciden adecuadamente.

Para realizar las mediciones experimentales del RP de la antena TT&C, se utilizaron las instalaciones del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR). Este cuenta con una cámara anecoica de 6 m por 8m por 12 m para mediciones de campo lejano en el rango de frecuencias de 300 MHz a 36 GHz. Esta cámara está equipada con un posicionador rotatorio para la antena en prueba (AUT) y una torre para el montaje de la antena de referencia. La Fig. 4 muestra (a la izquierda) la maqueta del USAT-I con el sistema de antena montado en el posicionador rotatorio, mientras que la antena de referencia (a la derecha) está montada en la torre. Esta última es una antena de tipo helicoidal monofilar, tal como se ve en la imagen, y se encuentra adecuadamente calibrada.

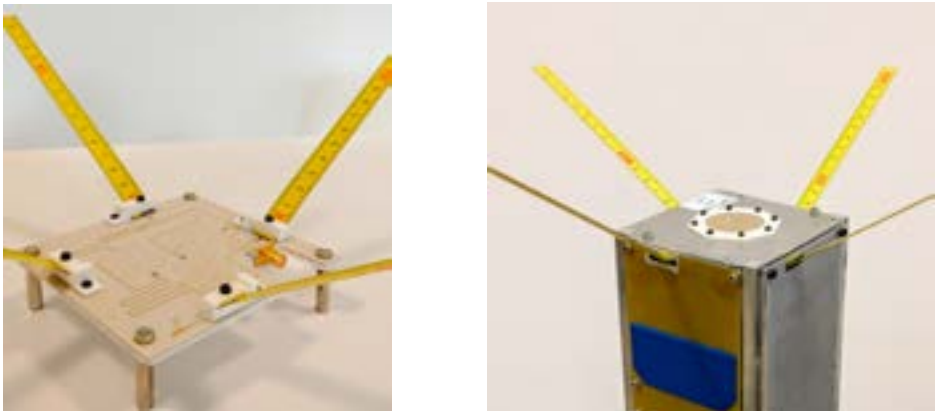


Fig. 2: Antena UHF (izquierda) y sistema de antenas montado en el USAT-I (derecha).

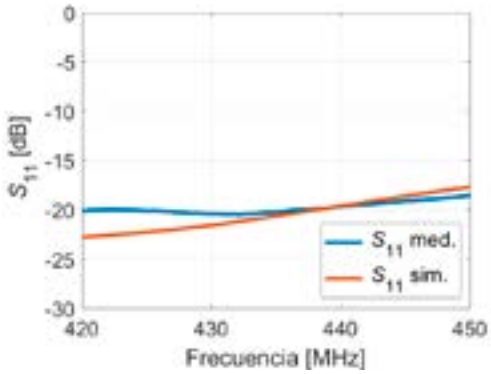


Fig. 3: Comparación de la S_{11} simulada y medida de la antena UHF.

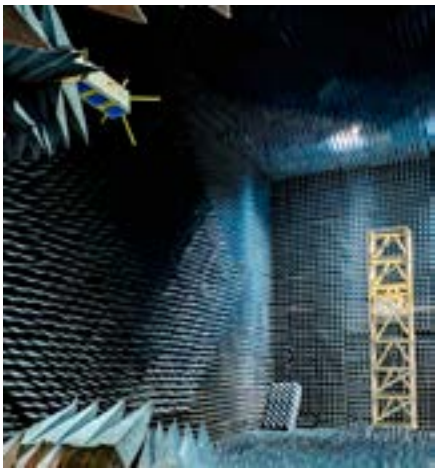


Fig. 4: Mediciones en la cámara anecoica.

La caracterización del RP de la antena *turnstile* de UHF montada en la maqueta del satélite se realizó en la cámara con el equipo adecuado de acuerdo con el estándar IEEE 149 [11]. El posicionador sostiene el CubeSat en el lado opuesto a la antena y apunta $\theta = 0°$ cuando está frente a la antena de referencia. Por lo tanto, el RP de la AUT se midió en los planos $\phi = 0°$ y $\phi = 90°$, variando la elevación θ, utilizando una antena helicoidal monofilar de polarización circular izquierda y otra de polarización circular derecha (LHCP y RHCP) (una a la vez) como referencia. Los resultados medidos y simulados se grafican en la Fig. 5, donde se puede ver que hay una buena correspondencia entre ellos. El RP es cuasi-isotrópico, con una ganancia máxima de aproximadamente $0\,$dB y polarización circular. Estos resultados nos permiten validar el diseño propuesto. Las principales diferencias aparecen cerca de $\theta = \pm 180°$, debido a la influencia del posicionador, ya que este sujeta la estructura del satélite desde su parte posterior.

B. Antena de banda S

La antena de banda S es de tipo *patch*, que en esencia está formada en capas por un plano de tierra, un laminado dieléctrico, y un parche que en este caso presenta forma circular. El tamaño del parche es óptimo para la frecuencia de operación, y a su vez se encuentra modificado para obtener la polarización circular requerida con un único punto de alimentación. Este enfoque permite lograr una implementación compacta y de bajo perfil compatible con el estándar CubeSat. La antena opera en la banda de frecuencias de 2400 a $2450\,$MHz y la ganancia LHCP es de aproximadamente $6\,$dBi. El diseño se implementó en un dieléctrico RO4350B, un material adecuado para aplicaciones de alta frecuencia y de relativo bajo costo.

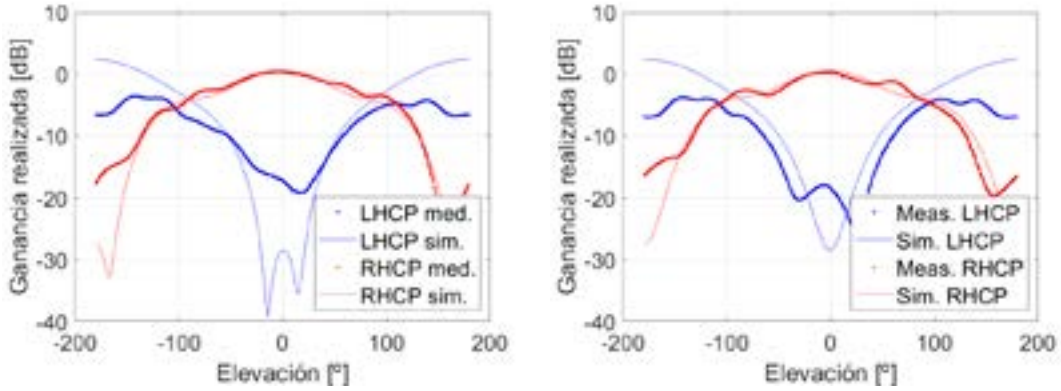


Fig. 5: RP a f=435.2MHz de la antena *turnstile*. Planos $\phi = 0°$ (izquierda) y $\phi = 90°$ (derecha).

La Fig. 2 muestra la antena *patch* montada en la maqueta del USAT-I. Se observa que el diseño es pequeño; sin embargo, su plano de tierra es en realidad la estructura del CubeSat que define una placa de aluminio coplanar de $10\,\text{cm}\times10\,\text{cm}$ justo detrás de la antena. Esto mejora sus propiedades de radiación. Particularmente, permite aumentar la directividad.
Los resultados S_{11} simulados y medidos de la antena de parche se presentan en la Fig. 6, donde se puede ver que coinciden correctamente.

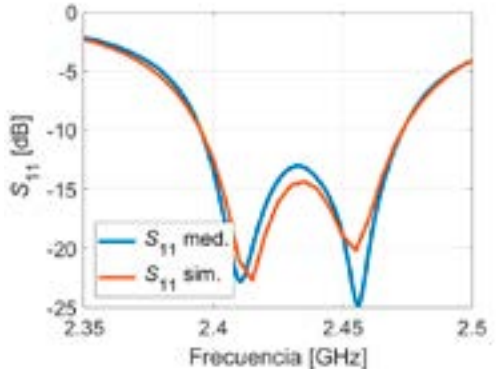


Fig. 6: Comparación de S_{11} simulada y medida de la antena de banda S.

De forma similar, se midió el RP de la antena de banda S dentro de la cámara anecoica. Cabe mencionar que las mediciones también se realizaron con la antena integrada en la maqueta USAT-I para analizar su rendimiento definitivo. El RP de la AUT se midió en los planos $\phi = 0°$ y $\phi = 90°$, variando la elevación θ, y utilizando una antena helicoidal monofilar LHCP y una RHCP sintonizadas en banda S como referencia. Las mediciones correspondientes se presentan en la Fig. 7, además de los resultados simulados. De la comparación, se puede observar que la ganancia LHCP y el ancho de haz de media potencia validan el rendimiento esperado, dado que son consistentes. La ganancia medida presenta una diferencia de aproximadamente $1.5\,\text{dB}$ con la simulada. Más allá de las posibles discrepancias constructivas de la antena, este valor se encuentra dentro de la tolerancia de los errores de medición de todo el sistema, incluyendo cables, antenas de referencia, equipos de medición y posibles componentes de multicamino residuales en la cámara. En el caso de los patrones RHCP, el RP medido es similar al simulado principalmente en $\phi = 0°$. Sin embargo, en el plano $\phi = 90°$ y cerca del lóbulo principal, las magnitudes medidas parecen ser mayores. Esto puede deberse a múltiples factores, ya sean mecánicos o electromagnéticos, como la orientación de la línea de visión o la alineación del montaje, la pureza de polarización de la antena de referencia o la tolerancia al error de medición. El hecho es que, idealmente, la ganancia en $\theta = 0°$ debería ser la misma independientemente de la alineación ϕ, por lo que estos resultados posiblemente estén influenciados por algunas incertidumbres de calibración. No obstante, incluso un rechazo de polarización cruzada de más de $10\,\text{dB}$ es aceptable.

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL TRANSCEPTOR

El diseño incluye un transceptor UHF que puede operar en modo semi-dúplex y un transmisor de banda S. Este módulo cuenta con un microcontrolador STM32 comercial que controla

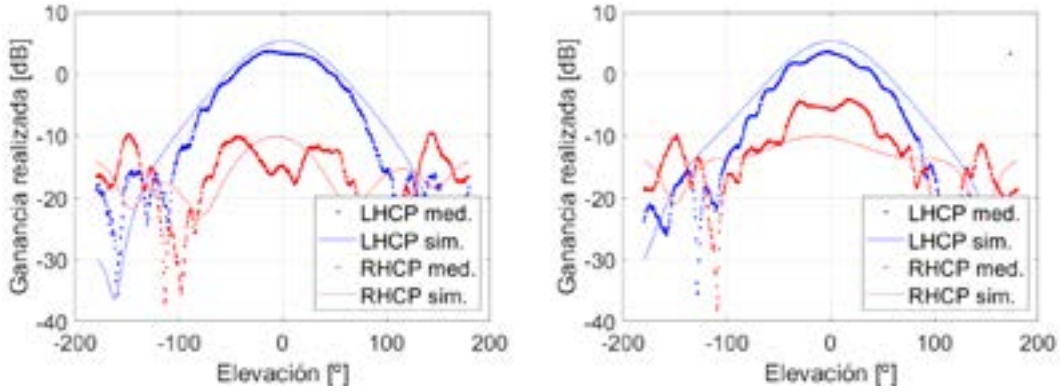


Fig. 7: RP a $f = 2.425$GHz de la antena *patch*. Planos $\phi = 0°$ (izquierda) y $\phi = 90°$ (derecha).

el funcionamiento del sistema y gestiona las comunicaciones con la computadora a bordo. Puede encontrar más información sobre la arquitectura del transceptor y los requisitos del enlace satélite-estación terrestre en [8], [9]. Cabe destacar que se tuvieron en cuenta todas las regulaciones de potencia y ancho de banda impuestas por los organismos reguladores del espectro radioeléctrico, así como las características de las estaciones terrenas requeridas.
Se recopilará una gran cantidad de datos de los experimentos científicos, por lo que se planea utilizar una velocidad de datos de 250 kbps para la banda S. Por el contrario, debido a las reglamentaciones de uso del espectro, el enlace UHF operará a velocidades de datos más bajas, del orden de 9.6 kbps para el enlace de bajada y 1.2 kbps para el enlace subida. En la Tabla I se detallan las especificaciones más importantes de la configuración del sistema.
La Fig. 8 muestra el transceptor fabricado con el factor de forma requerido. El mismo ha sido implementado en una placa de cuatro capas [9]. Finalmente, esta placa se coloca dentro de una carcasa de aluminio (no presente en la foto) que facilita la disipación del calor y la protege contra interferencias electromagnéticas y radiación espacial. A su vez, también reduce la interferencia electromagnética hacia otros módulos como la computadora a bordo.



Fig. 8: Placa de telecomunicaciones.

V. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para validar el sistema de comunicaciones, se conectaron las antenas a la placa del transceptor y se realizaron pruebas para confirmar su correcto funcionamiento. El objetivo fue verificar que el sistema transmitiera y recibiera paquetes de datos con un mínimo de errores e interrupciones. Las pruebas no replican los enlaces reales entre satélites y estaciones terrestres ni evalúan completamente la fiabilidad o eficiencia del sistema.
La prueba del enlace de comunicación de banda S se realizó con el USAT-I y la antena receptora dentro de la cámara anecoica para reducir cualquier posible efecto multicamino. Una placa transceptora se conectó a la antena helicoidal LHCP de banda S utilizada previamente para medir el RP. El experimento arrojó resultados satisfactorios con el transceptor transmitiendo señales moduladas 2-GFSK a velocidades de 500 kbps e inferiores.
Para el enlace UHF, se estableció la comunicación con la estación terrestre instalada para el Programa Satelital Universitario, que se muestra en la Fig. 9. El transceptor se encontraba a 550 m de distancia en la terraza de un edificio, con línea de visión directa hacia la estación terrestre. La diferencia de altitud era de aproximadamente 60 m, lo que requería que la antena de la estación estuviera orientada a un ángulo de elevación de aproximadamente $7°$. Se



Fig. 9: La antena de la estación terrena de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (izquierda), y pruebas funcionales del enlace en UHF (derecha).

pudo establecer el enlace de comunicaciones TT&C y los paquetes de datos se transfirieron correctamente con señales moduladas en 2-GFSK a 100 kbps e inferiores.

VI. CONCLUSIONES

Se presentó la implementación y validación del sistema de comunicaciones del primer satélite de la UNLP, el USAT-I. Se midió el desempeño de las antenas montadas en la estructura del CubeSat en una cámara anecoica. Los resultados fueron satisfactorios, demostrando que cumplen con los requisitos de diseño. Por otra parte, se probó todo el sistema incluido el transceptor para demostrar su correcto funcionamiento en entornos controlados y exteriores. Las pruebas incluyeron la transmisión y/o recepción a una placa de desarrollo y a la estación terrestre dedicada. Finalmente, cabe destacar la versatilidad del sistema de comunicaciones implementado, planeado para poder ser reutilizado o adaptado para otras misiones CubeSats.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía) por proporcionar las instalaciones y el personal para realizar las mediciones de las antenas.

REFERENCIAS

[1] A. Zeedan and T. Khattab, “CubeSat Communication Subsystems: A Review of On-Board Transceiver Architectures, Protocols, and Performance,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 88161-88183, 2023.
[2] S. A. Botta, et al., “UNLP’s First Cubesat, USAT-I: GNSS-RO and GNSS-R Technology Demonstrator,” in 3rd IAA Latin American Symposium on Small Satellites, Brasilia, Brasil, 2022, pp. 310—319.
[3] J. Wickert, et al., “GEROS-ISS: GNSS Reflectometry, Radio Occultation, and Scatterometry Onboard the International Space Station,” IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 9, no. 10, 2016, pp. 4552–4581.
[4] S. Jin and A. Komjathy, “GNSS Reflectometry and Remote Sensing: New Objectives and Results,” Advances in Space Research, vol. 46, 2010, pp. 111–117.
[5] Y. Sun, et al., “The FENGYUN-3C Radio Occultation Sounder GNOS: A Review of the Mission and its Early Results and Science Applications,” Atmospheric Measurement Techniques, vol. 11, no. 10, 2018, pp. 5797–5811.
[6] Y. Sun, et al., “GNOS-II on FENGYUN-3 Satellite Series: Exploration of Multi-GNSS Reflection Signals for Operational Applications,” Remote Sensing, vol. 15, no. 24, 2023.
[7] K. Cook, C. J. Fong, M. J. Wenkel, P. Wilczynski, N. Yen, and G. S. Chang, “FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS Radio Occultation Constellation Mission for Global Weather Monitoring,” in 2013 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2013, pp. 1-8.
[8] S. M. Lombardozzo, S. Rodríguez, and P. A. Roncagliolo, “Development of an Experimental Telemetry System,” in CASE 2017, 2017.
[9] S. M. Lombardozzo and P. A. Roncagliolo, “Diseño de un Transmisor de Telemetría Doble Banda para CubeSats,” in X Congreso Argentino de Tecnología Espacial, 2019.
[10] S. M. Lombardozzo, G. R. López La Valle, and P. A. Roncagliolo, “Diseño de las Antenas de Comunicaciones para la Misión USAT-I,” in 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina, San Juan, Argentina, 2022.
[11] IEEE std 149-1979 (revision of IEEE std 149-1965).

Modelado analítico y basado en datos de histéresis pulmonar

Stella, Joaquín[1]; Evangelista, Carolina A.[1]; Riva, Diego A.[1]; Puleston, Paul F.[1]

[1]GECEP-Instituto LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP-CONICET, La Plata, Argentina(1900)
Consultas: joaquin.stella@alu.ing.unlp.edu.ar

Resumen

La histéresis respiratoria, observable en la diferencia de recorrido de la curva P-V entre inspiración y espiración, se acentúa en enfermedades como asma, bronquitis y SARS-COVID19. Sin embargo, los modelos tradicionales suelen tratar la compliance pulmonar como constante, omitiendo esta característica relevante. Este trabajo propone modelar la histéresis mediante un enfoque analítico, ajustando parámetros a datos reales para simular la presión pulmonar con mayor precisión. Se logró reducir errores a menos del 5% (NRMSE) y simplificar el ajuste de parámetros.
Además, se exploraron redes neuronales recurrentes (RNN) para modelar dinámicamente las señales respiratorias, comparando arquitecturas para minimizar errores.
Se concluye que ambos enfoques permiten simular distintos pacientes según los requerimientos específicos.

PALABRAS CLAVES: Histéresis respiratoria; Ventilación mecánica; Modelo Vaiana Rosati Redes Neuronales Recurrentes (RNN).

Introducción

En fisiología respiratoria es de interés conocer los procesos que llevan a cabo los tejidos del sistema. Analizando relaciones entre el volumen, las presiones y el flujo de aire que circula por las vías respiratorias se pueden conocer detalles sobre el sistema respiratorio de un paciente y sus afecciones respiratorias. Para ello nos basamos en un modelo equivalente eléctrico del sistema respiratorio (Figura 1) y la ecuación de movimiento del sistema respiratorio:

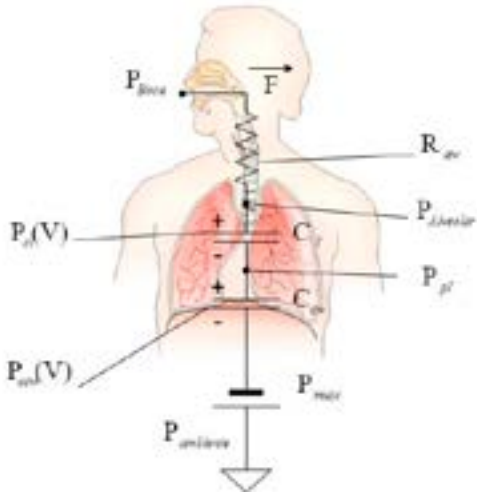


Figura 1. Modelo equivalente eléctrico.

$$P_B = P_{cl}(V) + P_{ccw}(V) + F\,R_{aw} - P_{musc} \qquad (1)$$

donde V es el volumen de aire en el sistema, F el flujo en las vías respiratorias, P_B la presión en la boca, P_{cl} la presión en los pulmones, P_{ccw} la presión en la caja torácica, P_{musc} la presión muscular y P_{aw} la resistencia en las vías aéreas. Cuando el paciente se encuentra anestesiado, P_{musc} se vuelve despreciable. La presión alveolar, P_A puede definirse como:

$$P_A = P_{cl}(V) + P_{ccw}(V) - P_{musc} \qquad (2)$$

y, suponiendo que el paciente está anestesiado, puede calcularse como:

$$P_A = P_B - F\,R_{aw} \qquad (3)$$

En una persona respirando, la relación entre el volumen y la presión de aire en los pulmones presenta un fenómeno de histéresis. La histéresis respiratoria es la diferencia de recorrido entre la inspiración y la espiración del ciclo respiratorio en el gráfico de presión y volumen

(P-V), y se suele tomar de referencia para diagnóstico y para implementar estrategias de ventilación. Enfermedades respiratorias como el asma, la bronquitis, COVID19 y otras infecciones respiratorias agudas provocan que la histéresis sea más notoria.
Se ha propuesto tanto el uso de modelos de histéresis, tanto generales como especializados para abordar esta problemática. Algunos modelos se basan en expresiones analíticas o diferenciales, logrando representar los distintos caminos durante el ciclo respiratorio generados por la histéresis. Recientemente, se han adoptado los modelos basados en datos, que consisten en entrenar modelos estadísticos con datos experimentales, hasta que estos se ajusten a las características de una señal de referencia.
En la Parte I de este trabajo se empleó el modelo Vaiana-Rosati para modelar la histéresis de pacientes de COVID19. En la Parte II se realizó la búsqueda de hiperparámetros, entrenamiento y validación de una red neuronal recurrente (RNN) con datos de pacientes divididos por sexo y por su condición de salud: sanos, fumadores, asmáticos y consumidores de vaper. En las conclusiones, se discutieron las ventajas y desventajas de cada enfoque.

Parte I: Modelo Vaiana-Rosati

Metodología

El modelo de histéresis Vaiana-Rosati es un modelo de histéresis desarrollado con la finalidad de poder representar comportamientos histeréticos complejos observados en el análisis de estructuras. En su formulación analítica, el modelo está descrito como una función a trozos, cuya expresión depende del signo de la derivada de la entrada u.
Cuando $\dot{u} > 0$, la curva tiene la forma (3), y cuando $\dot{u} < 0$, tiene la expresión (4).

$$f(u,u_j^+) = \begin{cases} c^+(u,u_j^+) & \text{when } u < u_j^+ \quad \text{(a)} \\ c_u(u) & \text{when } u > u_j^+. \quad \text{(b)} \end{cases} \quad (4), \qquad f(u,u_j^-) = \begin{cases} c^-(u,u_j^-) & \text{when } u > u_j^- \quad \text{(a)} \\ c_l(u) & \text{when } u < u_j^-. \quad \text{(b)} \end{cases} \quad (5)$$

Donde u+j y u-j son los valores de u para los cuales la curva llega a sus extremos. c^-, c^+, c_u y c_l son funciones no lineales del volumen y del flujo y dependen de un conjunto de 16 parámetros. Estos parámetros, que se encuentran en la expresión de las curvas, son: k_b^+, k_b^- , f_0^+, f_0^-, α^+, α^-, β_1^+, β_1^-, β_2^+, β_2^-, γ_1^+, γ_1^-, γ_2^+, γ_2^-, γ_3^+, γ_3^-.
Los datos de pacientes consisten de señales Pb (en cmH2O), volumen (ml) y flujo de aire (ml/s). Para llevar a cabo el ajuste del modelo, se ingresará como entrada el volumen, como derivada de la entrada el flujo, una R_{aw} = 0,002, y se buscará obtener una señal de presión alveolar P_A a partir de (3), modificando el menor número de parámetros posible.

Resultados

Se ajustó el modelo a los datos de pacientes con COVID19 de forma manual, obteniéndose los resultados de la Tabla 1. Los parámetros β_2 se mantuvieron en 0,0035, y los parámetros γ en cero. En Fig. 2, pueden verse los gráficos P-V de 4 de los pacientes.

Tabla 1. Valores de parámetros utilizados para ajustar el modelo Vaiana-Rosati a cada paciente, y el error cuadrático medio normalizado.

N°	f_0^+	f_0^-	k_b^+	k_b^-	α^+	α^-,	β_1^+	β_1^-	NRMSE
1	2691.711	-1987.3232	4.485	-0.126	0.8993	0.35836	-100	280	0.04194
2	1987.875	-1547.52	3.1395	-0.225	0.253	0.527	100	350	0.037
3	2667.6.6	-987.04	1.0465	-0.225	0.069575	0.4216	-100	280	0.03998
4	2338.767	-1036.64	2.2425	-0.105	0.061985	0.4216	-100	280	0.0427
5	4565.57175	-2960.6736	2.7209	-0.105	0.1012	0.39525	-100	280	0.04022

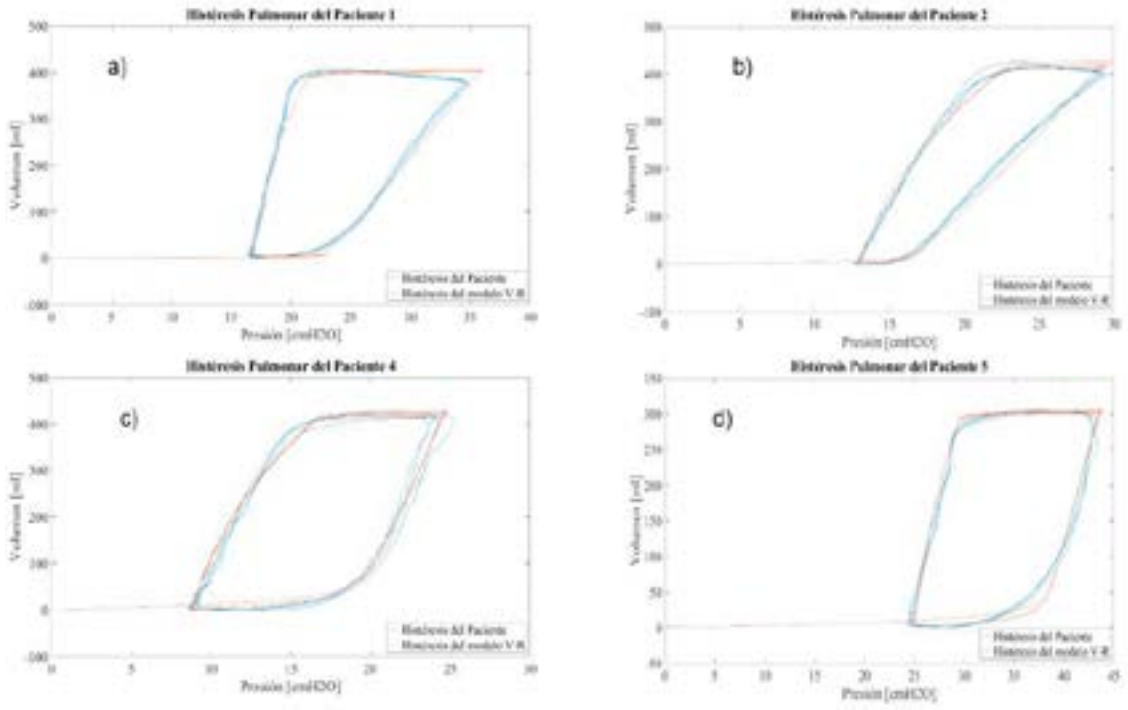


Figura 2. Gráficas P-V de los datos de presión alveolar en pacientes (azul) y los obtenidos por el modelo (naranja) para los pacientes 1 (a), 2 (b), 4 (c) y 5 (d).

Parte II: Modelado con Redes Neuronales Recurrentes
Metodología

Recientemente, el desarrollo de nuevos algoritmos de aprendizaje automático y una mayor disponibilidad de datos para entrenarlos, ha ocasionado que el uso de modelos basados en datos se extienda a numerosas ramas de la ciencia y la ingeniería. Entre los modelos más populares, se encuentran las redes neuronales profundas (DNN), que se basan en la interconexión de neuronas artificiales o perceptrones. En la salida de los perceptrones se aplican las llamadas funciones de activación, que permiten incorporar no linealidades al modelo y restringen los valores de salida. Al entrenar una red neuronal profunda, se hace uso del algoritmo backpropagation, que aplica una optimización por descenso de gradiente en cada peso de la red neuronal. Es de interés identificar cuáles son las características propias de la red neuronal que no se ajustan durante el entrenamiento y e influyen en el mismo, tales como la cantidad de neuronas por capa y la cantidad de capas. Estas configuraciones, conocidas como “hiperparámetros” del modelo, se pueden identificar con distintas técnicas, entre las cuales se encuentra el “grid search” o búsqueda en grilla, que es una búsqueda exhaustiva sobre un conjunto predefinido de combinaciones posibles.
Si bien se han utilizado distintas arquitecturas de redes neuronales, resultan de especial interés para modelado de histéresis las denominadas redes neuronales recurrentes (RNN). Estas redes consisten de perceptrones con memoria, ya que una de las conexiones de entrada de cada uno de ellos es su salida para la entrada anterior (Figura 3). Esto permite representar la dependencia temporal propia de la histéresis, y se ha aprovechado para modelar distintos sistemas no lineales. Entre las funciones de activación más utilizadas para regresión con RNN, se encuentra la tangente hiperbólica. Dado que la histéresis pulmonar presenta una curva sigmoide similar, se decidió emplearla en las neuronas realimentadas de la red.

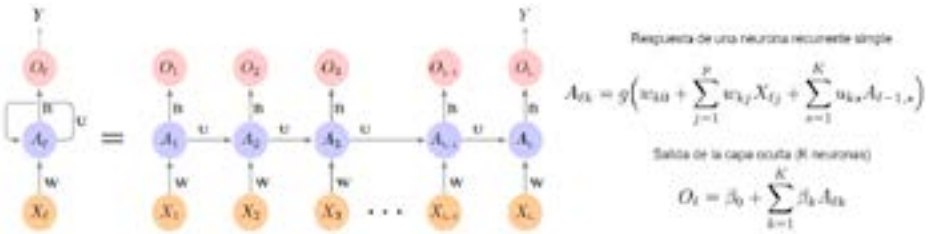


Figura 3. Neurona recurrente A_ℓ (con parámetros W, U y B), que recibe una entrada X_ℓ y arroja una salida O_ℓ (James et al., 2023).

El dataset utilizado para entrenar la red neuronal es de acceso público, y sus datos fueron obtenidos de 80 sujetos voluntarios (Guy et al., 2023). Los sujetos pueden clasificarse en 4 grupos de igual tamaño y distribución de sexo (10 mujeres y 10 hombres): personas sanas, personas fumadores, personas que padecen asma y personas consumidoras de cigarrillo electrónico (vapeadores). De cada uno se dispone de las señales de volumen de aire, flujo y presión en la boca. Se decidió tomar los primeros 30 segundos de cada señal, ya que cada 30 segundos se aplicó en los sujetos un nivel distinto de presión externa (PEEP). De forma análoga a la sección anterior, se ingresan como entrada el volumen y el flujo, y se obtiene como salida una señal de presión, que en este caso será P_B.

Resultados

La identificación de hiperparámetros se llevó a cabo seleccionando 5 de los pacientes de cada grupo y aplicando la técnica de búsqueda por grilla sobre una combinación de hiperparámetros posible: cantidad de neuronas por capa (16, 32, 64 o 128) y cantidad de capas (1, 2 o 3). En cada combinación, se aplicó validación cruzada de 4 pliegues. Se entrenó utilizando el algoritmo de descenso de gradiente Adam, un tamaño de lote de datos por ajuste (“batch size”) de 128, y se realizaron 200 pasadas (“epoch”). En las Figuras 4 y 5 se encuentran los mapas de calor con los resultados de la identificación de hiperparámetros. Una vez obtenida la mejor configuración para cada grupo, se entrenó el modelo con 9 de los pacientes, dejando el restante para validar su desempeño. En las Figura 6 y 7 se puede ver la gráfica de presión P_B para el paciente de cada categoría, junto a la respuesta del modelo, con el NRMSE obtenido.

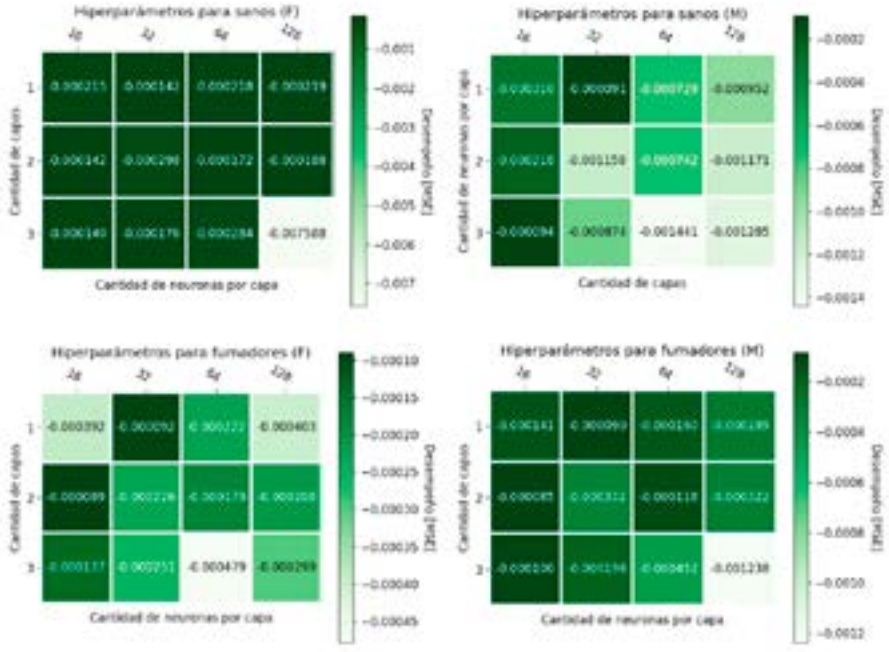


Figura 4. Mapa de calor de ajuste de hiperparámetros para los pacientes sanos y fumadores de ambos sexos.

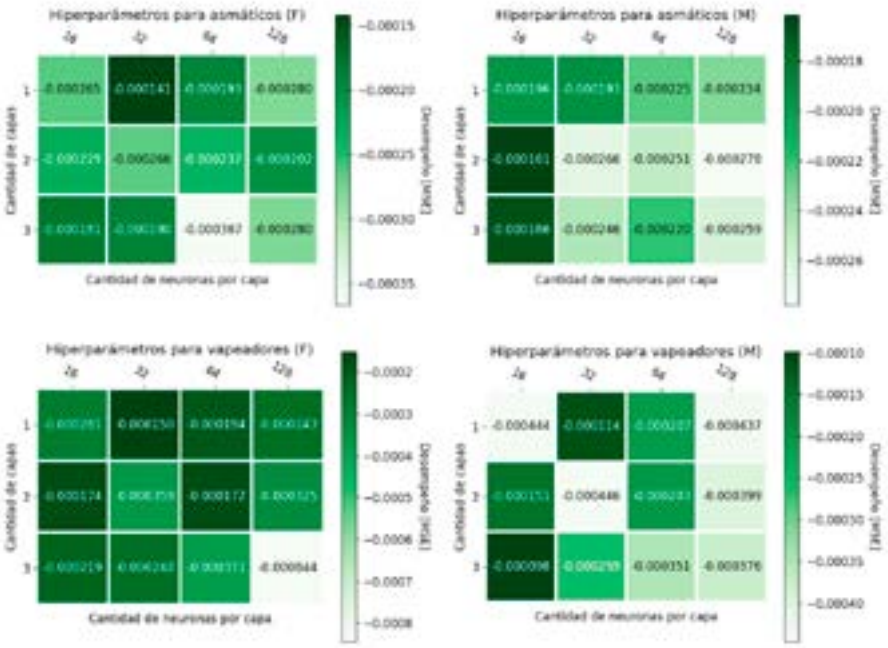


Figura 5. Mapa de calor de ajuste de hiper parámetros para los pacientes asmáticos y vapeadores de ambos sexos.

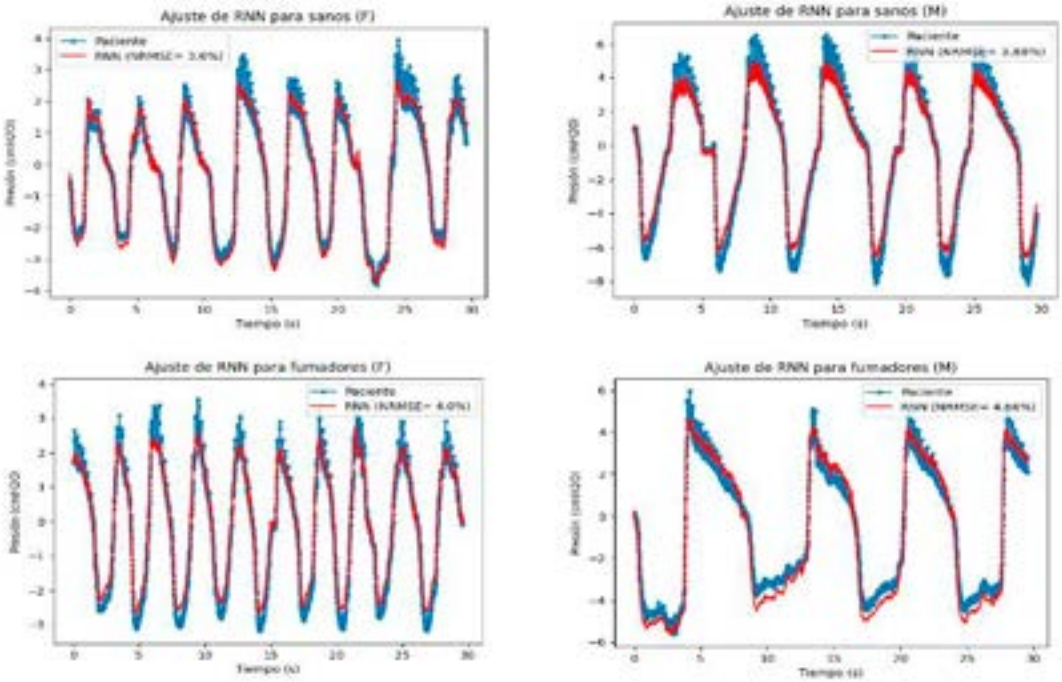


Figura 6. Señal de presión obtenida de pacientes y respuesta del modelo RNN para los pacientes sanos y fumadores de ambos sexos.

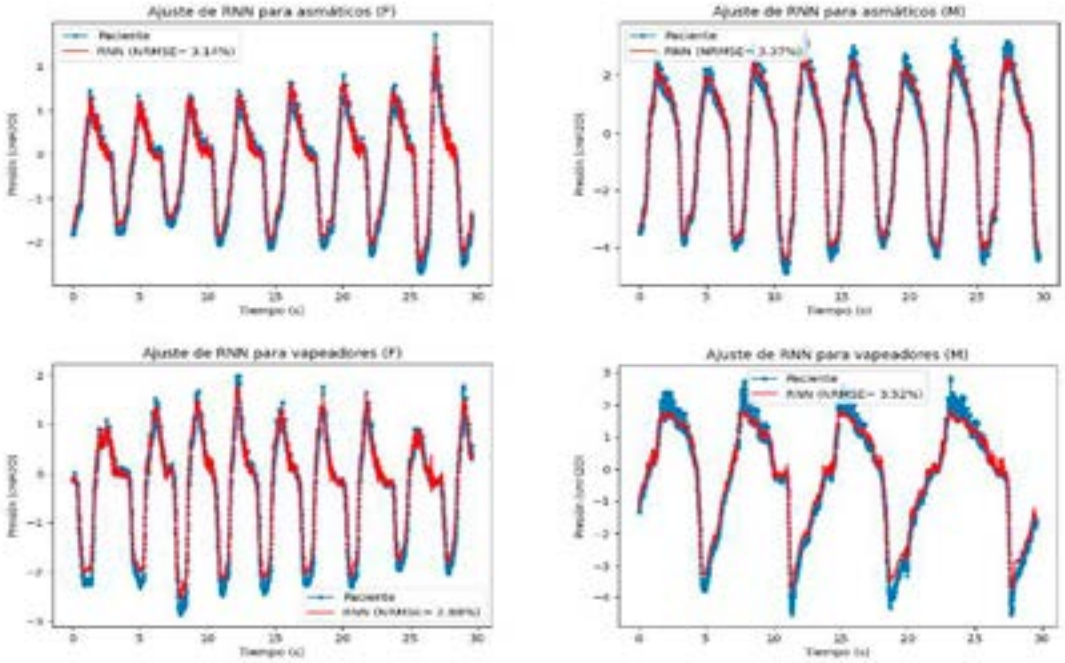


Figura 7. Señal de presión obtenida de pacientes y respuesta del modelo RNN para los pacientes asmáticos y vapeadores de ambos sexos.

Conclusiones

En la primera parte del trabajo se obtuvieron buenos modelos de pacientes de distintas características con COVID19. Se pudo identificar el efecto que tiene cada parámetro en la forma de la curva. Esto permitirá "generar" pacientes simulados que "tengan" distintas afecciones respiratorias. También, se logró identificar qué parámetros del modelo son más significativos. Esto permitirá explorar la simplificación del modelo general original.
En la segunda parte del trabajo pudieron identificarse configuraciones de red RNN simple adaptadas al modelado de señales de presión de pacientes reales, con distintas características. Tras entrenar a los modelos, pudo ajustarse los modelos RNN a los datos de los pacientes con un NRMSE menor al 5% durante la validación.
Mientras el modelo paramétrico realiza una identificación de un conjunto de parámetros que caracterizan al paciente, el modelo basado en datos fue entrenado con distintos pacientes con distintas características, a fin de obtener parámetros que se corresponden a un modelo que se ajusta a distintos pacientes de una misma categoría.
Se han planteado modelos de histéresis híbridos (Wang et al., 2023), incluyendo tanto la flexibilidad de los modelos basados en datos como la interpretabilidad de modelos paramétricos. Se planea a futuro explorar su uso para modelar la histéresis respiratoria.

Bibliografía

Guy, E. F. S., Clifton, J. A., Caljé-van der Klei, T., Chen, R., Knopp, J., Moeller, K., & Chase, J. G. (2023). *Respiratory dataset from PEEP study with expiratory occlusion* (version 1.0.0). *PhysioNet*. https://doi.org/10.13026/d767-e709.
James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R.,, Taylor, J. (2023). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in Python*. Cham: Springer. ISBN: 978-3-031-38746-3.
Tianyu Wang, Mohammad Noori, Wael A. Altabey, Zhishen Wu, Ramin Ghiasi, Sin-Chi Kuok, Ahmed Silik, Nabeel S.D. Farhan, Vasilis Sarhosis, Ehsan Noroozinejad Farsangi (2023). *From model-driven to data-driven: A review of hysteresis modeling in structural and mechanical systems*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 204, 110785, ISSN 0888-3270, https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110785.

ALGORITMO BUMPLESS PARA UNIDADES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON CONTROLADORES DEPENDIENTES DEL MODO DE OPERACIÓN

Muñoz Pablo[1], Gonzalez, Sergio[1, 2], Mantz, Ricardo[1,2, 3], Puleston, Pablo[1, 2]

[1]Grupo Estrategias de Control y Electrónica de Potencia (GECEP) Instituto LEICI UNLP-CONICET.
[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
[3]Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICpBA).
pablo_e.m@hotmail.com

I. Introducción

Las microrredes, entendidas como un conjunto de unidades de generación distribuida (UGD), sistemas de almacenamiento y cargas, son clave para mejorar la resiliencia del sistema eléctrico [1]. En condiciones normales las microrredes operan en modo conectado a la red donde pueden importar o exportar energía y deben tener la capacidad de aislarse frente a cualquier eventualidad, como fallas en la red principal, para garantizar el suministro de energía a las cargas locales [2]. Los desafíos y objetivos de control son diferentes en cada modo de operación [3]. En este sentido, existen dos estrategias de control bien establecidas para las UGDs [4]. En modo isla, al menos una UGD debe operar en modo “formador de red” donde la UGD se controla para regular la tensión y la frecuencia de la microrred. En modo conectado a la red, las UGDs pueden operar en modo “seguidor de red” inyectando potencia. Por lo tanto, la transición entre estos modos de operación implica cambiar de controlador. Si la salida de los controladores no coincide en el instante de conmutación, se produce un salto en la acción de control que genera transitorios no deseados en la potencia de salida de las UGDs afectando la tensión y la frecuencia [5]. En este trabajo se propone un algoritmo denominado SMRC-BT (de sus siglas en ingles *Sliding-Mode Reference Condictioning Bumpless-Transfer*), que actúa sobre la referencia del lazo de control y fuerza el establecimiento de un régimen deslizante sobre una superficie y obliga a reducir el error entre la salida de los controladores a cero [6]. Resulta un método simple y directo que requiere un mínimo esfuerzo diseño e implementación. Además, no requiere el conocimiento del modelo de planta ni mediciones adicionales. Presenta propiedades de robustez que garantizan evitar saltos en la acción de control y los transitorios indeseados asociados en la potencia de salida de las UGDs que afectan a la calidad de potencia de la microrred sin importar en qué momento se conmute el controlador. Se evaluó el desempeño del algoritmo propuesto en un escenario de aislamiento no intencional. En las figuras se muestran los transitorios de potencia activa y reactiva de la UGD y la tensión y la frecuencia en el punto de conexión de la microrred con la red principal. Los resultados muestran que la estrategia propuesta contribuye a lograr una transición suave entre los modos de operación de la microrred evitando picos transitorios en las potencias de la UGD, saltos de fase en la tensión y una recuperación más rápida de la frecuencia.

II. Modos de operación y control de la UGD

II-A. Modo conectado a la red

Normalmente, en el modo conectada a la red las UGDs se controlan para que se comporten como una fuente de corriente usando la tensión y la frecuencia impuestas por la red como referencia. La Fig. 1 muestra el lazo de control implementado en el marco de referencia sincrónico d-q para el modo seguidor de red \cite{du2020modeling}, donde se usa un lazo de enganche de fase (PLL) para sincronizase con la tensión de la red, controladores PI en el lazo de realimentación de corriente e inyección de señales cruzada para desacoplar los lazos en la dirección d y q. De este modo, las corrientes se pueden regular rápidamente. El funcionamiento de las UGDs que operan en modo seguidor de red a menudo está regulado por un controlador de un nivel superior que establece los valores de referencia para P^* y Q^* \cite{rocabert2012control}.

II-B. Modo isla

La Fig. 2 muestra el lazo de control del modo formador de red típico implementado en el marco

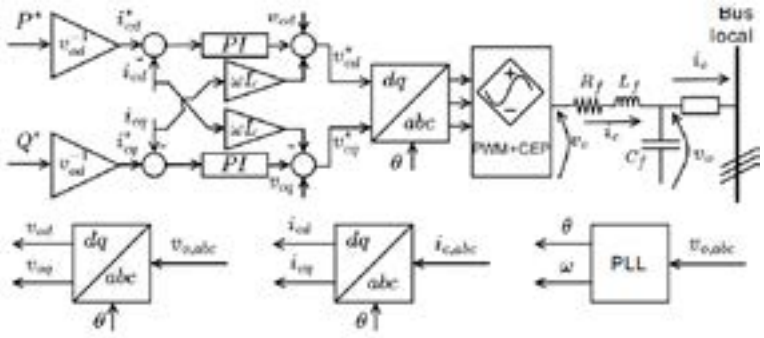


Figura 1: Lazo de control para el modo de operación seguidor de red

de referencia sincrónico d-q \cite{pogaku2007modeling}. La ley de control consta de tres lazos anidados, a saber: lazo de control de corriente, lazo de control de tensión y lazo de control de potencia.

El lazo de corriente y tensión se diseñan como un lazo en cascada para regular la tensión de salida. Ambos lazos utilizan controladores PI de la forma

$$PI_i = \left(k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}\right), PI_v = \left(k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s}\right) \quad (1)$$

Los controladores PI están sintonizados para rechazar rápidamente las perturbaciones y proporcionar suficiente amortiguamiento al filtro de acoplamiento LC. Además, para mejorar la compensación frente a desbalances de potencia se usa una inyección *feed-forward* proporcional de la corriente de salida.

Para permitir que las UGDs operen en paralelo y compartan la demanda de potencia, el lazo de droop es una estrategia bien establecida \cite{guerrero2010hierarchical}. Este lazo de externo establece la magnitud y la frecuencia (y por ende el ángulo de fase, θ) de la tensión de salida de acuerdo con la demanda de potencia activa y reactiva:

$$\omega = \frac{\omega_c}{s+\omega_c}(P^* - P)n_p + \omega^*,$$
$$v_{od}^* = \frac{\omega_c}{s+\omega_c}(Q^* - Q)n_q + V^*. \quad (2)$$

siendo ω^* la frecuencia nominal del sistema, V^*la amplitud de tensión nominal, P^*la referencia de potencia activa, Q^*la referencia de potencia reactiva, $\omega_c$la frecuencia de corte del filtro de mediciones y n_p y n_q las pendientes del droop.

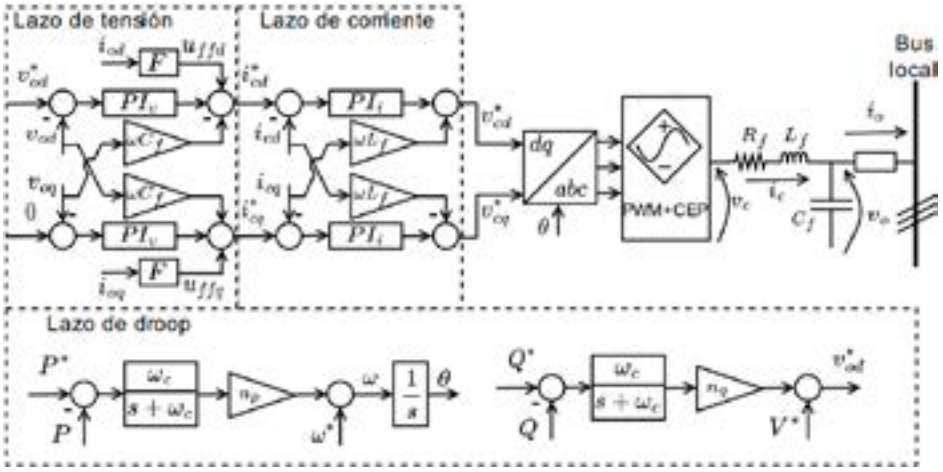


Figura 2: Lazo de control para el modo de operación seguidor de red

III. Bumpless transfer mediante acondicionamiento de referencia por modos deslizantes

La Fig. 3 muestra la estructura de control general de la UGD, donde la acción de control que se aplica al sistema $\hat{u} = \left(\hat{v}_{cd}\ \hat{v}_{cq}\ \hat{\theta}\right)^T$ depende del modo de operación seleccionado. En modo seguidor de red $\hat{u} = u_1$, y en modo formador de red $\hat{u} = u_2$. El bloque SMRC-BT genera las señales w_{s1}, w_{s2} y w_{s3} que actúan sobre las referencias del controlador formador de red de tal

manera que se establezca un régimen deslizante sobre una superficie que garantice que $u_2 = \hat{u}$ en todo momento. Si esto se cumple, u_2 coincide con la acción de control que se está aplicando al sistema $\hat{u}$ y se evitan saltos en la acción de control cuando se conmutan los controladores debido al aislamiento de la microrred. En lo que sigue se detalla el diseño del algoritmo SMRC-BT.

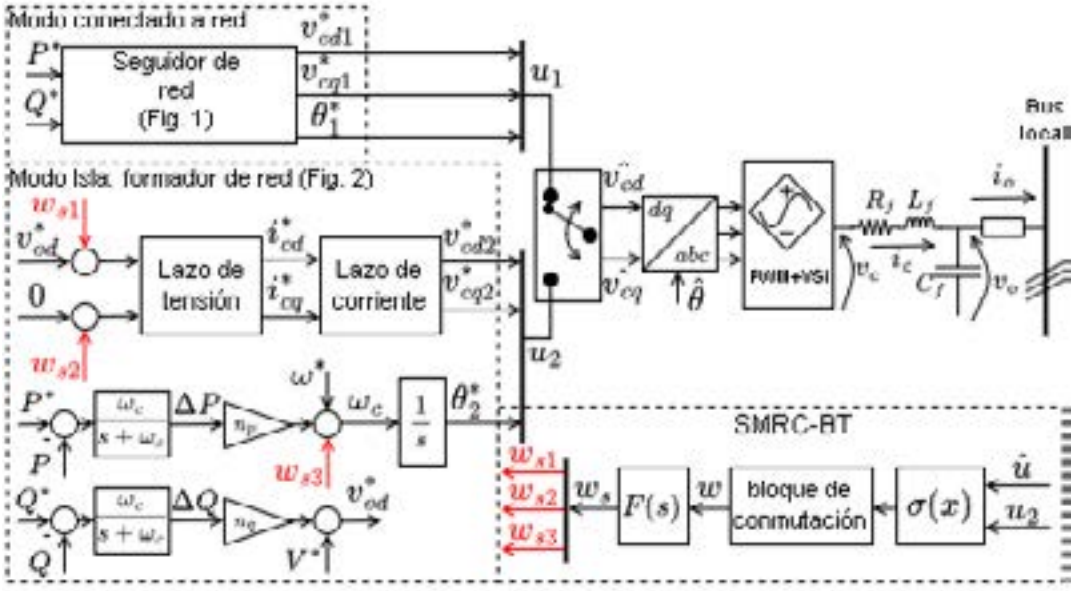


Figura 3: Estructura general de control de la UGD con el algoritmo SMRC-BT propuesto

La ley de control del modo formador de red tiene la siguiente representación en espacio de estado:

$$C_{GFM}(s): \begin{cases} \dot{x}_c = A_c x_c + B_c e_c + H_c \\ u_2 = C_c x_c + D_c e_c + W_c \end{cases} \quad (3)$$

donde A_c es la matriz dinámica, B_c es la matriz de entrada, C_c es la matriz de salida, D_c es la matriz de transferencia directa, H_c y W_c son matrices que representan los términos de realimentación internos, desacoplamiento y *feed-forward*. $x_c = \left(x_{vd}\ x_{id}\ x_{vq}\ x_{iq}\ \theta_2^*\right)^T$ es el estado del controlador, donde los subíndices v y i significan lazo de tensión y corriente, respectivamente, y los subíndices d y q corresponden a las direcciones del marco de referencia sincrónico. $e_c = \left(e_{cd}, e_{cq}, \omega_c\right)^T = \left(v_{od}^* - v_{od} + w_{s1}, -v_{oq} + w_{s2}, \Delta P n_p + \omega^* + w_{s3}\right)^T$ es el error acondicionado, y $u_2 = \left(v_{cd2}^*, v_{cq2}^*, \theta_2^*\right)^T$ es la acción de control generada. Las matrices del controlador son las siguientes:

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{iv} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{iv} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ k_{pv} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad H_c = \begin{pmatrix} 0 \\ u_{ffd} - v_{oq}\omega C_f - i_{cd} \\ 0 \\ u_{ffq} - v_{od}\omega C_f - i_{cq} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C_c = \begin{pmatrix} k_{pi}k_{iv} & k_{ii} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{pi}k_{iv} & k_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad D_c = \begin{pmatrix} k_{pi}k_{pv} & 0 & 0 \\ 0 & k_{pi}k_{pv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad W_c = \begin{pmatrix} u_{ffd} - v_{oq}\omega C_f - i_{cd} - i_{cq}\omega L_f \\ u_{ffq} - v_{od}\omega C_f - i_{cq} - i_{cd}\omega L_f \\ 0 \end{pmatrix}$$

El lazo de acondicionamiento está formado por la función de conmutación $\sigma(x)$ y el bloque de conmutación donde se implementa la acción discontinua. Además, se implementa un filtro paso bajo $F(s)$ para filtrar la conmutación de alta frecuencia. Este filtro se puede representar en espacio de estados como

$$F(s):\begin{cases}\dot{x}_f = -\lambda_{f_c}\mathbb{I}_3 x_f + \mathbb{I}_3 w \\ w_s = (w_{s1}, w_{s2}, w_{s3})^T = -\lambda_{f_c}\mathbb{I}_3 x_f\end{cases} \quad (4)$$

donde $\lambda_F > 0 \in \mathbb{R}$ es el autovalor del filtro.
La señal discontinua $w \in \mathbb{R}^3$, implementada en el bloque de conmutación de la Fig. 3, está dada por

$$w = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{pmatrix} sign(\sigma(x_c)) \quad (5)$$

Donde los enteros M_{ii} son ganancias y la función $sign(\sigma)$ se define por componente como:

$$sign(\sigma_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma_i > 0 \\ -1 & \text{si } \sigma_i < 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

El objetivo del lazo SMRC-BT que actúa sobre las referencias del controlador $C_{GFM}(s)$ es el establecimiento de un régimen deslizante sobre la superficie $\mathcal{S} = \{x_c: \sigma(x_c) = 0\}$. Por lo tanto la función de conmutación $\sigma(x_c)$ se debe diseñar de tal manera que $\sigma = 0$ implique que la salida del controlador formador de red u_2 coincida con la acción de control que se está aplicando al sistema $\hat{u} = u_1$. De esta forma, no importa en qué momento se conmute la ley de control, no habrá saltos en la acción de control y se evitarán transitorios indeseados en las variables controladas.
Finalmente, para que el SMRC-BT pueda imponer el establecimiento de un régimen deslizante colectivo sobre la superficie $\mathcal{S}$ se deben cumplir algunas condiciones [6]. En primer lugar, observemos que la derivada de la función de conmutación $\sigma(x_c)$ tiene la forma:

$$\dot{\sigma} = d(x_c) - \eta D(x_c) sign(\sigma). \quad (7)$$

Entonces se deben cumplir las siguientes condiciones:

$(C1)$ $D(x_c)$ es definida positiva, $D(x_c) + D(x_c)^T > 0$ (8)

$(C2)$ $\eta > \sqrt{m}\|d(x_c)\|_2/\lambda_{min}(x_c)$ (9)

Con $\eta > 0$ y λ_{min} el mínimo autovalor de $(D(x_c) + D(x_c)^T)/2$.
Por lo tanto, para cumplir el objetivo $u_2 = \hat{u}$ y verificar la condición (8) se propone la siguiente función de conmutación:

$$\sigma(x_c) = \hat{u} - u_2 - K\left(u_2 - \dot{\hat{u}}\right) = \begin{pmatrix} \widehat{v_{cd}} - v^*_{cd2} \\ \widehat{v_{cq}} - v^*_{cq2} \\ \hat{\theta} - \theta^*_2 - k(\omega_c - \hat{\omega}) \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix}, k > 0 \quad (10)$$

donde se introdujeron estados del controlador en la función de conmutación ya que $C_{GFM}(s)$ es estrictamente propio (D_c es singular). Note que esto no implica la medición de variables adicionales ya que las señales internas del controlador están siempre disponibles.
Luego, reemplazando (3), (4) y (5) en la derivada de la función de conmutación (10) y comparando con (7) se llega a:

$$d(x_c) = \dot{\hat{u}} + K\ddot{\hat{u}} - C_c(A_c x_c + B_c e_c + H_c) - (D_c + KC_c B_c)\left(\dot{e} - \lambda_f w_s\right) + \dot{W}_c \quad (11)$$

$$\eta D(x_c) = (D_c + KC_c B_c)\lambda_f M. \quad (12)$$

Por lo tanto, se puede garantizar el establecimiento de un régimen deslizante colectivo si $d(x_c)$ y $D(x_c)$ en (11) y (12) satisfacen la condición (8) y (9}), respectivamente. La matriz $D(x_c)$ depende del controlador (3) y, en consecuencia, la condición (8) se puede satisfacer eligiendo los signos en la diagonal de M de modo que todos los menores principales de $D(x_c)$ sean positivos, lo que garantiza que $D(x_c)$ es definida positiva. Por otro lado, el valor $\lambda_{min}(x_c)$ puede incrementarse aumentando las ganancias en M. Esto permite, una vez verificado (8), ajustar las ganancias en M para satisfacer la condición (9). En este sentido, cabe mencionar que M se puede elegir de forma conservadora ya que el lazo de acondicionamiento está restringido al lado de baja potencia del sistema. De esta manera, se asegurará el establecimiento de un régimen deslizante colectivo y, en consecuencia, el error entre el vector de salida del controlador u_2 y la entrada de la planta $\hat{u}$ se reducirá a cero, eliminando saltos en la acción de control cuando se realice la conmutación. Además, una característica importante del SMRC-BT que hereda de los

regímenes deslizantes es su robustez frente a los cambios de referencia y las perturbaciones de salida.

VI. Resultados

Para evaluar el algoritmo SMRC-BT propuesto, se considera el sistema de la Fig. 4. La microrred se conecta a la red principal a través de una llave (CB) en el punto de conexión común (PCC). Las UGDs son generación distribuida con convertidores. UGD2 sólo inyecta potencia a la red independientemente del modo de operación de la microrred. UGD1 puede dar soporte a la red en modo isla y opera en modo seguidor de red cuando está conectada a la red principal y en modo de formador de red cuando se aísla. El controlador de las UGD no tiene control sobre el CB y, por lo tanto, se desconoce su estado. El CB se puede abrir como consecuencia de una perturbación en la red, como fallas. Después que el CB se abre las UGDs detectan la nueva condición de operación y conmutan la ley de control. Se emplea un algoritmo de detección de aislamiento pasivo [7], en base a una desviación de $\pm 10\%$ en tensión o ± 0.5 Hz en la frecuencia por un período de tiempo de 100 ms.

El controlador seguidor de red se sintoniza para que el lazo cerrado presente una constante de tiempo de 0.05 s. En la tabla 1 se muestran los parámetros del controlador formador de red y del SMRC-BT. La propuesta fue examinada extensamente en varias condiciones de funcionamiento. En particular, el ejemplo ilustrativo presentado en esta sección evalúa el aislamiento a los 0.2 s, donde antes del aislamiento las UGDs operan en modo de seguidor de red. Pasados 100 ms se detecta la condición de aislamiento y la UGD1 cambia su controlador para regular la tensión y la frecuencia de la microrred.

Tabla 1:Parámetros del sistema

VA_{base}	$45\ kVA$	k_{ii}	$16e^{-3}$
V^*	$325\ V$	k_{pi}	10.5
ω^*	$2\pi 50 \frac{rad}{s}$	k_{iv}	390
R_f	$0.1\ \Omega$	k_{pv}	0.05
L_f	$1.35\ mH$	n_p	$9e^{-5}$
C_f	$25\ \mu F$	n_q	$0.5e^{-3}$
M_{11}	$5V^*$	λ_f	1000
M_{22}	$5V^*$	k	0.001
M_{33}	$3\omega^*$	F	0.75

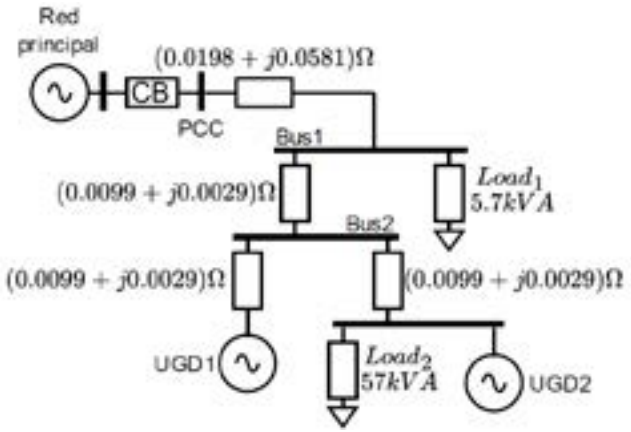
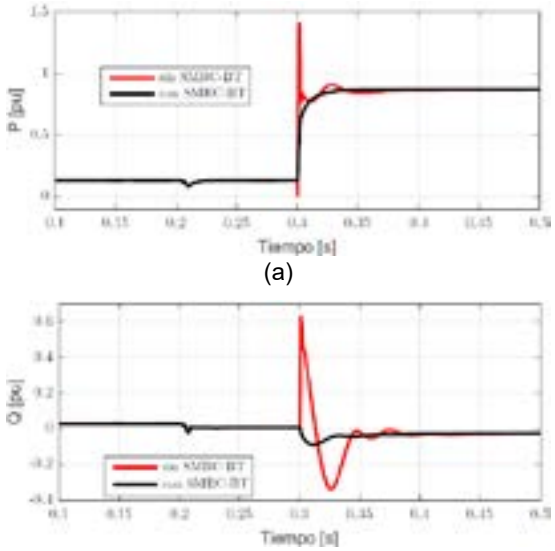


Figura 4: Red de prueba

Las Fig. 5 muestra la potencia activa y reactiva entregadas por UGD1. En trazos rojos se muestran la potencia entregada sin el SMRC-BT y se observa que experimentan grandes picos y un transitorio poco amortiguado. En la Fig. 5a la potencia activa de la UGD1 presenta picos que alcanzan los 1.5 pu, un comportamiento similar se observa en la Fig. 5b donde la potencia reactiva de la UGD1 alcanza un pico de 0.6 pu en el transitorio. Por otro lado, en trazo negro se muestran las potencias entregadas por UGD1 con el SMRC-BT propuesto. Se observa que con el algoritmo *bumpless* se evitan los grandes picos transitorios logrando una transición suave y más amortiguado.

Los transitorios de potencia abruptos afectan negativamente a los transitorios de tensión y frecuencia. En la Fig. 6 se muestra el transitorio de la frecuencia y la tensión en el Bus2 con y sin acción del SMRC-BT, en trazo negro y rojo, respectivamente. Se puede observar que debido a la desconexión de la red principal a los 0.2 s la tensión y la frecuencia caen abruptamente. Luego, durante los próximos 100ms las UGDs continúan operando en modo seguidor de red, y por lo tanto, como ninguna unidad de generación se ocupa de regular la tensión y la frecuencia no se recupera el nivel de tensión y la frecuencia continua cayendo. Por último, a los 0.3s se detecta la condición de aislamiento y UGD1 cambia su controlador y pasa a regular la tensión y la frecuencia de la microrred. Se puede observar que sin el SMRC-BT hay un ligero retraso en la recuperación del nivel de tensión y un salto de fase que se eliminan por completo con la implementación del SMRC-BT. En la Fig. 6b se observa una caída considerable de la frecuencia de más de 5Hz antes de alcanzar el estado estacionario sin la compensación SMRC-BT. Se observa una mejora con la implementación del SMRC-BT donde la frecuencia comienza a

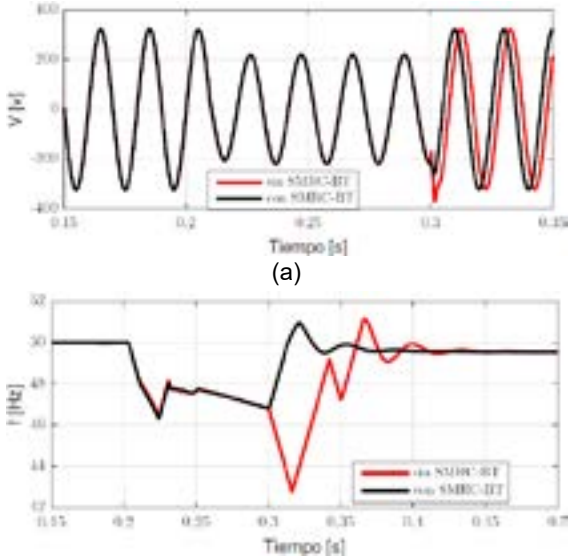
recuperarse ni bien se conmuta el controlador de UGD1 y alcanza el estado estacionario de forma suave. La discrepancia en la acción de control en el instante de conmutación es la que provoca el notable deterioro descrito anteriormente en las potencias, la tensión y la frecuencia. Cabe señalar que este desajuste puede ser mayor o menor dependiendo de cuándo se abre el CB, se detecta el aislamiento y se produce la conmutación de la ley de control. Además, si esta diferencia es lo suficientemente grande, puede llevar a la microrred a la inestabilidad. Por lo tanto, es vital contar con algún mecanismo que limite esta diferencia para garantizar que la microrred no se desestabilice ante un aislamiento no intencional.



(a)

(b)

Figura 5: Potencia UGD1. (a) Activo. (b) Reactivo.



(a)

(b)

Figura 6:(a) Tensión en PCC.(b) Frecuencia en PCC

V. Conclusiones

En este trabajo se propone una estrategia *bumpless-transfer* para la conmutación de los controladores de las UGDs en el proceso de aislamiento del sistema de potencia de una microrred. La propuesta se basa en diseñar un lazo de acondicionamiento de referencia por modos deslizantes sobre el esquema típico de control empleado en las UGDs. Este lazo adicional actúa sobre la referencia del controlador formador de red de tal manera que garantiza que su salida coincida con la entrada de la planta en todo momento. El desempeño de la estrategia propuesta se evaluó en simulación en un escenario de aislamiento. Los resultados muestran la efectividad de la propuesta, a saber: evita que las UGDs presenten picos transitorios de potencia resultando en un transitorio suave y más amortiguado; evita que haya saltos de fase en la tensión y una excesiva caída en la frecuencia de la microrred contribuyendo así a una recuperación más rápida en los niveles de tensión y frecuencia. Además, la estrategia propuesta se muestra robusta frente a la gran perturbación que representa el proceso de aislamiento. Efectivamente, en ningún momento el sistema se escapa de la superficie lo que garantiza una acción de control suave independientemente del instante de conmutación del controlador.

Referencias

[1] Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. IEEE power and energy magazine, 5(4), 78-94.

[2] D'silva, S., Shadmand, M., Bayhan, S., & Abu-Rub, H. (2020). Towards grid of microgrids: Seamless transition between grid-connected and islanded modes of operation. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, *1*, 66-81.

[3] Souza, M. E. T., & Freitas, L. C. G. (2022). Grid-connected and seamless transition modes for microgrids: an overview of control methods, operation elements, and general requirements. *IEEE Access*, *10*, 97802-97834.

[4] Rocabert, J., Luna, A., Blaabjerg, F., & Rodriguez, P. (2012). Control of power converters in AC microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, *27*(11), 4734-4749.

[5] Ganjian-Aboukheili, M., Shahabi, M., Shafiee, Q., & Guerrero, J. M. (2019). Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *11*(3), 2106-2114.
[6] Garelli, F., Mantz, R. J., & De Battista, H. (2011). Advanced control for constrained processes and systems.
[7] Pvps, I. (2002). Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems. *Report IEA PVPS T5-09*, *180*.

TÉCNICAS DE BLINDAJE PARA LA MEDICIÓN DE SENSORES CAPACITIVOS FLOTANTES REMOTOS

Catacora, Valentín Andrés[1], Spinelli, Enrique Mario[1] y Reverter, Ferran[2]

[1]Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales LEICI (CONICET-UNLP), Calle 48 y 116 CC 91(1900), La Plata, Buenos Aires, Argentina
[2]Departamento de Ingeniería Electrónica, Universitat Politècnica de Catalunya, Carrer d'Esteve Terradas 7 (08860), Castelldefels, Barcelona, España
E-mail: valentin.catacora@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Los sensores capacitivos son dispositivos que miden magnitudes físicas o químicas a través de variaciones en su capacitancia eléctrica. Entre sus aplicaciones típicas se incluyen la medición de humedad, desplazamiento lineal y angular, proximidad, presión, fuerza, nivel de líquido, aceleración, y dedos sobre paneles táctiles. Las características principales de estos sensores son su robustez, bajo costo y consumo energético, alta sensibilidad y resolución, y amplio ancho de banda [1].

Según el potencial aplicado a sus electrodos, los sensores capacitivos pueden clasificarse en dos subgrupos: sensores capacitivos flotantes (FCSs, por sus siglas en inglés) y sensores capacitivos puestos a tierra (GCSs, por sus siglas en inglés). Los FCSs poseen ambos electrodos sin conexión a un potencial fijo y, por lo tanto, se encuentran disponibles para el circuito de medición. En cambio, los GCSs tienen uno de sus terminales conectado a tierra. Los FCSs son inherentemente más versátiles y fáciles de instrumentar, pero hay aplicaciones en las que, por razones de construcción o seguridad eléctrica, se deben emplear GCSs [2].

En función de su ubicación, los sensores capacitivos pueden situarse cerca (sensores no remotos) o lejos (sensores remotos) del circuito electrónico que los mide. En el escenario no remoto, el circuito de lectura se dispone *in situ* con la capacitancia a medir, es decir, en la misma placa de circuito impreso (PCB) o incluso en el mismo circuito integrado. Por el contrario, en el escenario remoto, existe una cierta distancia entre la capacitancia del sensor y el circuito de medida, que puede ser de varios metros [3].

En este artículo se presenta un estudio de la medición de FCSs remotos y sus limitaciones prácticas. Se analizaron cómo afectan los componentes parásitos y las no idealidades propias de una medición real, provenientes tanto del circuito de medición como del cable de interconexión blindado utilizado para que el sensor sea remoto e inmune a interferencias electromagnéticas (EMI).

A. Esquema de medición ideal

La medición de la capacitancia eléctrica de los sensores capacitivos se puede realizar con un amplificador de transimpedancia como se muestra en la Fig. 1 [4]. Este sistema de medida requiere de una fuente de tensión de referencia (v_i) que genera una corriente de entrada (i_x) proporcional a la capacitancia desconocida (C_x). Por la tierra virtual del amplificador operacional (AO), i_x puede calcularse como:

$$i_x(s) = v_i(s) s C_x. \tag{1}$$

Luego, esta corriente es transformada en la tensión de salida (v_o) al circular por las impedancias R_f y C_f del amplificador. Por lo tanto, la transferencia total de v_i a v_o en el dominio de Laplace es:

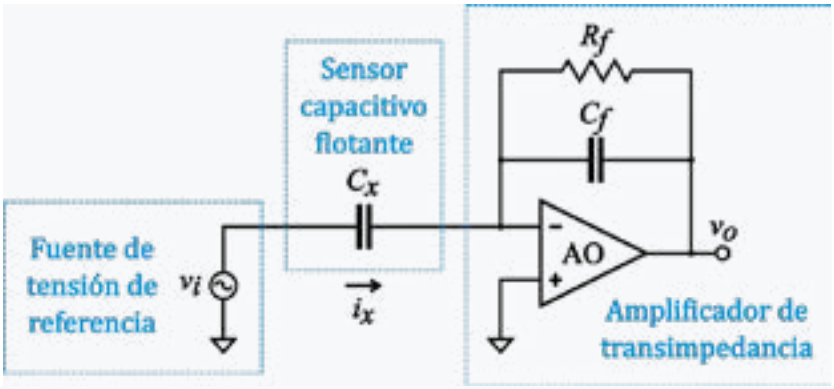


Fig. 1. Esquema de medición ideal de un sensor capacitivo flotante con un amplificador de transimpedancia.

$$T_{ideal}(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{-sC_xR_f}{1+sC_fR_f}. \quad (2)$$

Para frecuencias mucho mayores a la frecuencia de corte $f_c = 1/(2\pi R_f C_f)$, la transferencia del circuito se aproxima a:

$$T_{ideal}(s) \cong -C_x/C_f. \quad (3)$$

En ese caso, conociendo la amplitud de la tensión de entrada y midiendo la amplitud de la tensión de salida, puede estimarse la capacitancia C_x como:

$$C_x = \frac{|v_o|}{|v_i|}C_f. \quad (4)$$

El principal desafío en la medición de C_x es evitar el acoplamiento capacitivo de la EMI a la entrada del amplificador. Esto se vuelve crucial en mediciones remotas, donde el sensor capacitivo se conecta al amplificador a través de cable relativamente largo, como puede ser de 10 metros. En el estado del arte se han adoptado diferentes técnicas de blindaje para solucionar este problema dependiendo del tipo de sensor capacitivo. Sin embargo, estas técnicas incorporan elementos parásitos al sistema que pueden generar nuevos errores en la medición de la capacitancia. En este trabajo, se analiza la técnica de blindaje pasivo, que es aplicada típicamente en la medición de FCSs remotos, y sus limitaciones.

B. Esquema de medición real con blindaje pasivo

La técnica de blindaje pasivo consiste en envolver el cable de interconexión con una malla conductora conectada a tierra. De esta manera, las fuentes de interferencia no ingresan al nodo de entrada del amplificador, sino que circulan a tierra a través de la malla. Sin embargo, utilizar el blindaje pasivo en sensores remotos incorpora una capacitancia parásita (C_p) a la entrada del amplificador (Fig. 2). La magnitud de C_p depende del tipo y largo del cable, siendo 100 pF/m un valor típico para cables coaxiales.

Esta técnica es ampliamente utilizada en la medición de FCSs a pesar de la capacitancia parásita, ya que, en principio, sus efectos son reducidos por la tierra virtual del AO. No obstante, la fidelidad de la tierra virtual del AO depende de su ganancia de lazo abierto (A_{ol}) y, por lo tanto, puede verse deteriorada a medida que se aumenta la frecuencia de operación. A su vez, las capacitancias de entrada de modo-diferencial (C_{md}) y de modo-común (C_{mc}) (para la entrada inversora) del AO también limitan el funcionamiento del circuito, ya que quedan dispuestas en paralelo a C_p.

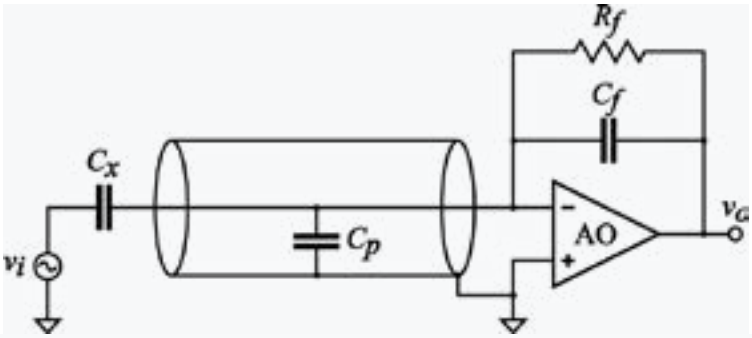


Fig. 2. Esquema de medición real con técnica de blindaje pasivo.

Considerando un AO con A_{ol} finita e incorporando C_p, C_{md} y C_{mc} al sistema de medida, la transferencia del blindaje pasivo para frecuencias mucho mayores a f_C puede aproximarse como:

$$T_{BP}(s) \cong \frac{-C_x/C_f}{1+\frac{C_p+C_x+C_f+C_{md}+C_{mc}}{A_{ol}(s)C_f}}. \quad (5)$$

De acuerdo con (5), la transferencia del circuito sufre una atenuación proporcional a C_p e inversamente proporcional a A_{ol} respecto a la transferencia ideal de (3). Por lo tanto, el error definido como la diferencia entre el valor ideal y el valor real de la tensión de salida v_o será mayor en las siguientes circunstancias: 1) para cables de interconexión largos que producen C_p grandes; 2) para frecuencias de operación altas donde A_{ol} toma valores pequeños. Puede observarse que, si A_{ol} toma valores relativamente grandes, la transferencia de (5) se aproxima a la transferencia ideal de (3). Sin embargo, también puede notarse que aunque no haya cable de interconexión ($C_p = 0$), las capacitancias C_x, C_f, C_{md} y C_{mc} imponen una cota mínima de error entre (5) y (3) que puede o no ser despreciable dependiendo del valor de A_{ol} a la frecuencia de operación.

La expresión de la transferencia obtenida en (5) fue validada por simulación con el software TINA de Texas Instruments para el siguiente caso de estudio: 1) debido a que los sensores capacitivos tienen un amplio rango de valores para C_x (desde 1 pF hasta 1 nF [4]), se consideró $C_x = 10\,pF$ como un valor típico, y se eligió $C_f = 1\,pF$ para lograr una ganancia nominal de 10; 2) se utilizó un valor de $R_f = 500\,M\Omega$ que proporciona, junto a C_f, una frecuencia de corte inferior suficientemente baja ($f_c = 318\,Hz$) para aplicaciones en sensores capacitivos, que suelen ser excitados con una frecuencia de operación de decenas a cientos de kHz; 3) se obtuvieron los parámetros de la hoja de datos del AO OPA320 de Texas Instruments como referencia para C_{md}, C_{mc} y A_{ol}; 4) para estudiar el comportamiento de un FCS desde el caso no remoto (sin cable) hasta el caso remoto con 10 metros de cable, se consideraron 11 valores equiespaciados de C_p entre 0 pF y 1 nF asumiendo 100 pF/m.

En la Fig. 3, se muestran las transferencias del circuito con blindaje pasivo para un AO real y distintos valores de C_p calculadas a partir de (5). De las curvas obtenidas, puede observarse que la transferencia del circuito con blindaje pasivo se ve atenuada respecto a la transferencia ideal de 20 dB. Para un mismo C_p, puede notarse que la atenuación aumenta con la frecuencia debido a la disminución de A_{ol}. En el caso de $C_p = 0\,pF$, el circuito se ve limitado sólo por las capacitancias remanentes y presenta un ancho de banda de 3 dB superior a 1 MHz. Sin embargo, al aumentar C_p, la atenuación se hace más notable y reduce el ancho de banda del circuito. Para una frecuencia de operación de 10 kHz, el módulo de la transferencia se muestra insensible al largo del cable para los componentes elegidos. Sin embargo, para una frecuencia de operación de 100 kHz, el circuito con blindaje pasivo produce un error en la tensión de salida de 77.07 % con $C_p = 1\,nF$ (10 m de cable blindado).

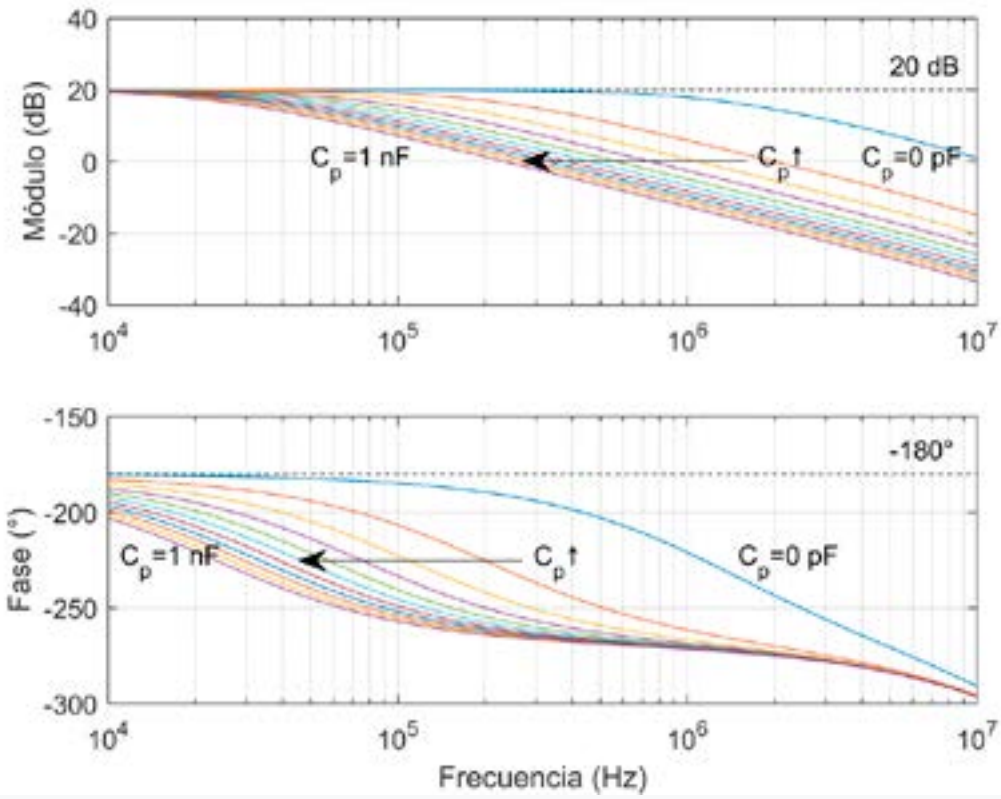


Fig. 3. Transferencia simulada del circuito con blindaje pasivo (Fig. 2) para un AO real y un rango de valores de C_p: la curva ubicada más a la derecha corresponde a $C_p = 0\,pF$; la curva ubicada más a la izquierda corresponde a $C_p = 1\,nF$; las curvas intermedias corresponden a pasos de 100 pF de C_p; la curva constante negra corresponde a la transferencia ideal de referencia (Fig. 1).

2. Parte experimental

Se realizaron pruebas experimentales para validar tanto el funcionamiento como las limitaciones del blindaje pasivo en la medición de FCSs descritas en este trabajo. Para ello, se desarrolló una PCB del esquema del circuito de la Fig. 2, con terminales disponibles para conectar capacitores que emulen distintos casos de C_x y C_p. La capacitancia del sensor C_x fue reemplazada por seis capacitores cerámicos en el rango de 1 a 10 pF. Por otro lado, se implementaron cuatro casos de largos de cable mallado con cuatro valores de C_p: 0, 100, 470 y 1000 pF. Asumiendo una relación de 100 pF/m, estos valores corresponden a 0, 1, 4.7 y 10 m, respectivamente. Los valores nominales de los componentes realimentados fueron $R_f = 500\,M\Omega$ y $C_f = 1\,pF$. Sin embargo, el valor real de C_f fue mayor debido a las capacitancias parásitas de R_f y de las pistas propias de la PCB. El valor total de C_f en la PCB fue de 1.7185 pF. El AO utilizado para las pruebas fue el OPA320, ya que ofrece baja tensión de alimentación, entrada y salida de riel a riel, bajo ruido y una A_{ol} alta en relación a los operacionales de propósito general.

El comportamiento del circuito fue evaluado para dos frecuencias de operación, 10 y 100 kHz, ya que son usuales en los FCSs. Se utilizó un amplificador *lock-in* (Stanford Research Systems SR860) para excitar la entrada del circuito con una sinusoide de $50\,mV_{RMS}$ y luego medir la amplitud de la señal de salida a través de una demodulación sincrónica. El AO fue alimentado por una fuente de CC (Keysight E3631A) a $\pm 2.5\,V$. La PCB fue ubicada dentro de una caja metálica conectada a tierra para evitar interferencias externas. Todas las capacitancias del circuito bajo estudio fueron previamente medidas con un analizador de impedancias (Keysight E4990A) a las dos frecuencias de operación elegidas (10 y 100 kHz).

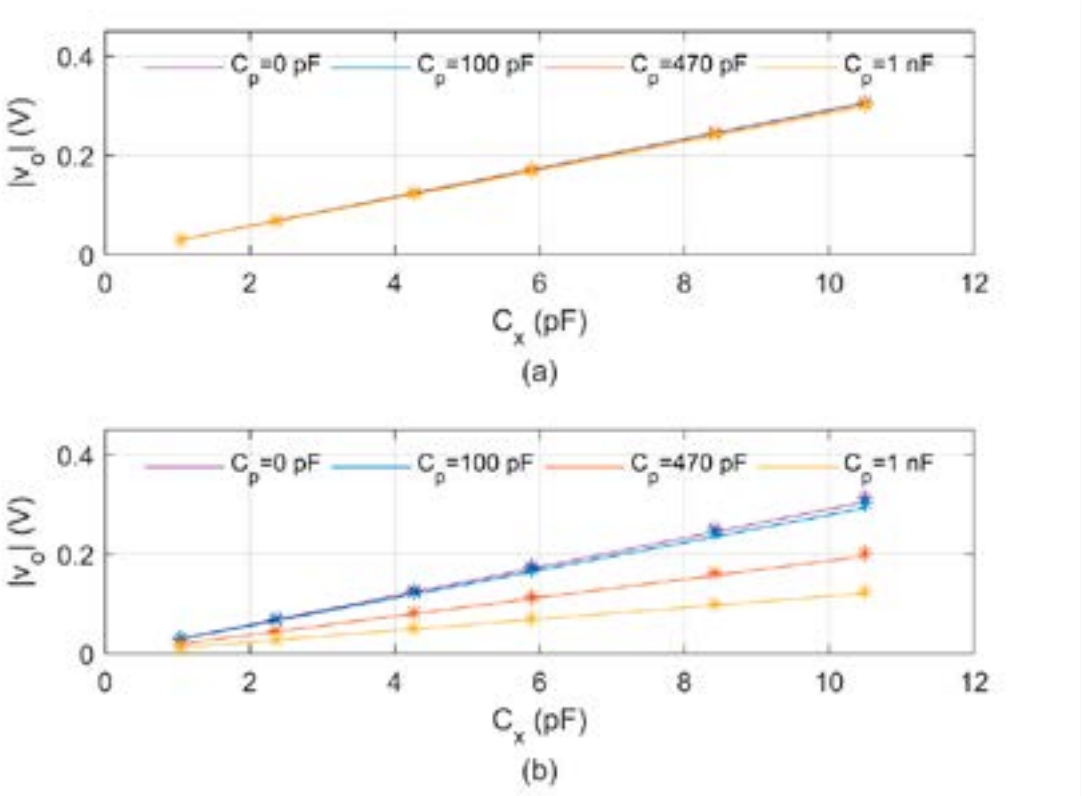


Fig. 4. Amplitud de la tensión de salida del circuito con blindaje pasivo a 10 kHz (a) y 100 kHz (b): los resultados esperados se muestran en línea continua y los resultados experimentales se muestran con asteriscos.

La tensión de salida del circuito fue inspeccionada con un osciloscopio (Agilent DSO-X-2012A) para verificar que la señal no presentara problemas de inestabilidad, ruido o interferencia. Para cuantificar el comportamiento del circuito implementado para cada caso de C_p, se calculó el error relativo porcentual utilizando la tensión de salida obtenida con $C_p = 0\ pF$ (caso no-remoto) como referencia.

3. Resultados y discusión

En las Figs. 4a y 4b se muestran las amplitudes RMS de salida medidas a las frecuencias de operación de 10 kHz y 100 kHz, respectivamente, en función de C_x para los cuatro casos de C_p. Se puede observar que los datos obtenidos experimentalmente ajustan correctamente a los esperados con la expresión (5), utilizando los valores de los componentes reales medidos para este experimento. También, se verifica que la amplitud de salida se ve más atenuada para una frecuencia de operación de 100 kHz (Fig. 4b) que para 10 kHz (Fig. 4a). A su vez, para una misma frecuencia de operación, el aumento de C_p genera una mayor atenuación en la señal de salida (Fig. 4b).

Las Figs. 5a y 5b muestran los errores relativos para 10 kHz y 100 kHz, respectivamente, en función de C_x y para tres valores de C_p respecto a la curva de referencia ($C_p = 0\ pF$). Se observa que los errores relativos son constantes respecto a la capacitancia del sensor C_x y que ajustan correctamente a los valores esperados. Considerando aceptable un error relativo menor a 5 %, el circuito a 10 kHz satisface la condición para todos los casos de C_p estudiados. Sin embargo, el error para la frecuencia de operación de 100 kHz resultó aceptable solo para el caso de $C_p = 100\ pF$, con un error cercano a 3 %. Los casos de $C_p = 470\ pF$ y $C_p = 1\ nF$ presentaron errores de aproximadamente 35 % y 60 %, respectivamente.

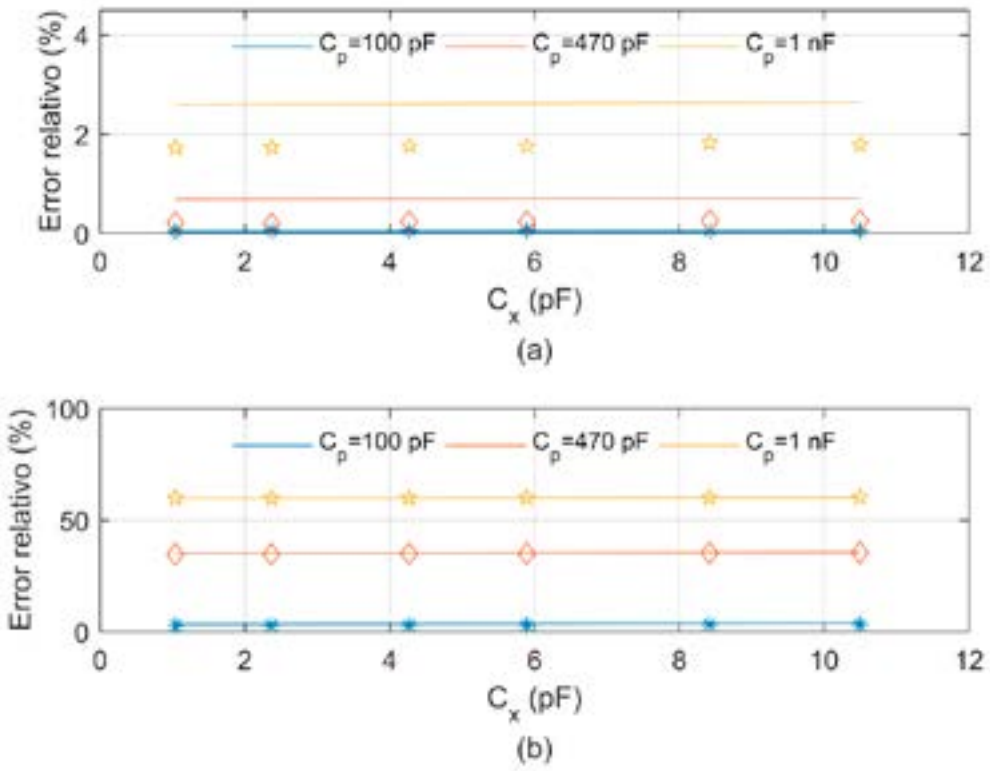


Fig. 5. Errores relativos en la medición del circuito con blindaje pasivo a 10 kHz (a) y 100 kHz (b): los resultados esperados se muestran en línea continua y los resultados experimentales se muestran con asteriscos.

4. Conclusiones

La técnica de blindaje pasivo para el rechazo de EMI en la medición de FCSs remotos agrega una capacitancia parásita al circuito que depende del largo del cable de interconexión. Esta capacitancia, junto con las limitaciones del AO a la frecuencia de operación, produce una atenuación no deseada en la señal de salida. Esta diferencia de la tensión de salida respecto al valor esperado genera errores que pueden ser inaceptables si la ganancia de lazo abierto no es suficientemente grande a la frecuencia de operación para el largo del cable dado.

Como trabajo a futuro, se propone implementar la técnica de blindaje activo, usualmente empleada en la medición de GCSs. Esta técnica consiste en copiar el potencial del nodo interno al blindaje, y así reducir los efectos de la capacitancia parásita. Los autores han implementado circuitos con blindaje activo en trabajos previos aplicados a sensores acoplados capacitivamente [5]. Simulaciones preliminares sugieren que es posible reducir el error dos órdenes de magnitud a 100 kHz y en las mismas condiciones de este trabajo.

5. Bibliografía

[1] F. Reverter, X. Li, and G. C. M. Meijer, “Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor,” *Sens. Actuators A: Phys.*, vol. 138, no. 1, pp. 1–8, Jul. 2007.

[2] D. Gelmini, M. A. Haberman, V. Ferrari, E. M. Spinelli and F. Reverter, “An Isolation Amplifier-Based Front-End Circuit for Grounded Capacitive Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–10, Jun. 2024, Art no. 2004210.

[3] M. A. Haberman, E. M. Spinelli and F. Reverter, “High-Linearity FrontEnd Circuit for Remote Grounded Capacitive Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–8, Feb. 2021, Art no. 2003108.
[4] O. Kanoun, A. Y. Kallel, A. Fendri, “Measurement Methods for Capacitances in the Range of 1 pF–1 nF: A review,” *Measurement*, vol. 195, p. 111067, May. 2022.
[5] V. A. Catacora, F. N. Guerrero and E. M. Spinelli, “Reducción de la capacidad de entrada de un amplificador mediante técnicas de Bootstrap,” *V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, pp. 386–392, Abr. 2019.

EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE ELECTROTECNIA DE LA FI – UNLP: LÍNEA DE BASE Y OPORTUNIDADES DE MEJORA

Wall, Carlos A.* Arnera, Patricia L.* Scribano Vera, Facundo**
Tompkins Palmier, Victoria** D'Angelo, Manuel* Carbajal, Valentín**

*IITREE-LAT-FI-UNLP
48 y 116. La Plata. Buenos Aires. Argentina
caw@iitree-unlp.org.ar

**FI-UNLP
1 y 47. La Plata. Buenos Aires. Argentina

1. Introducción

El edificio del Departamento de Electrotecnia (DE) de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad de La Plata (UNLP), Argentina, enfrenta varios desafíos en cuestión de Eficiencia Energética Eléctrica (EEE).

En el presente trabajo se aborda la identificación de problemáticas como excesos de consumo de energía, iluminación insuficiente e ineficiente. A partir de un exhaustivo relevamiento y análisis de datos obtenidos en mediciones realizadas, se detectaron oportunidades de mejora en lo que respecta al consumo de energía eléctrica en los espacios comunes del edificio. Con lo cual, se proponen medidas concretas para optimizar el uso de la energía eléctrica en los espacios comunes del edificio diferenciadas en tres ejes: uno técnico, uno social y uno de gestión. Se analiza la viabilidad técnico-económica de las propuestas y se realiza un análisis energético para evaluar el desempeño energético y la reducción de emisiones de CO2.

2. Descripción del edificio de electrotecnia

El edificio del DE se encuentra ubicado dentro del campus de la FI-UNLP, el mismo está constituido por aulas, anfiteatros, salas de conferencia, oficinas, laboratorios, espacios comunes de estudio, entre otros. Posee cuatro niveles, un subsuelo, planta baja, primer piso y segundo piso, abarcando así una superficie aproximada de 10400 m^2.

3. Problemáticas detectadas

Dentro de la FI, el edificio del DE destaca por sus amplias dimensiones y sus grandes consumos de energía. Debido a la potencia de las cargas instaladas y el consumo de energía eléctrica del campus, la FI contrata el servicio de energía eléctrica en Media Tensión (MT), lo cual influye en el valor de la tarifa. Al inspeccionar las facturas de energía eléctrica, se detectó que la potencia requerida por las instalaciones supera la potencia contratada, lo que ha resultado en la imposición de penalidades por parte de la empresa distribuidora de energía.

Consultando con los encargados de mantenimiento del edificio, se reveló que las luminarias del edificio se encienden desde las 6:30 hs hasta las 22:00 hs, siendo estas accionadas por personal de maestranza. Se detectó que ciertos espacios como aulas y anfiteatros carecían de interruptores individuales para las luminarias, lo que implica que la iluminación permanezca encendida independientemente de si estos espacios son ocupados o no. Lo mismo sucede en pasillos y halls, los cuales a pesar de no ser demasiado transitados tienen la iluminación constantemente encendida.

Por otro lado, en el segundo piso del DE se encuentra un hall de estudio ampliamente utilizado por los estudiantes, el cual posee buena iluminación natural. Sin embargo, la iluminación artificial suele estar encendida durante periodos de tiempo en que no resulta necesaria.

Asimismo, compañeros y docentes manifestaron cierto nivel de incomodidad en cuanto a la iluminación de las aulas del edificio. Utilizando como referencia la norma UNE-EN 12464:2022 [1] y luego de realizar mediciones con un luxómetro, se concluyó que los niveles de iluminación

están por debajo de los valores recomendados en las horas que no se cuenta con iluminación natural.

Finalmente, se verificó que la gran mayoría de las luminarias y equipos utilizados en todo el edificio, son cargas no lineales que podrían ocasionar corrientes distorsionadas y generar pérdidas adicionales en la red de distribución interna.

Estos hallazgos representan oportunidades de mejora para optimizar la EEE, se abordan problemas de utilización de energía eléctrica en iluminación, iluminación ineficiente o deficiente, desbalance de cargas y distorsiones de corrientes.

Para tomar dimensión de las diferentes magnitudes eléctricas, se realizaron mediciones en el tablero principal de acometida, que incluyen, tensiones, corrientes, energía, calidad de servicio, entre otras.

4. Parte experimental: Relevamiento, adquisición y análisis de datos

El primer paso para establecer la línea de base de energía eléctrica del DE consistió en realizar un relevamiento de las instalaciones y el tiempo en que las mismas se utilizan, para lo que se consideró como referencia la Reglamentación AEA 90364-8:2019 [3]. Se crearon hojas de cálculo en las que se presenta la información del equipamiento, su uso, su potencia nominal, las horas de uso al año, tipo de tecnología, método de control y consumo anual. A partir de allí se determinó la potencia instalada destinada a iluminación, climatización y proyectores, lo cual se presenta en la Figura 1. Se determinó que la mayor parte del consumo anual se reparte proporcionalmente entre iluminación y climatización.

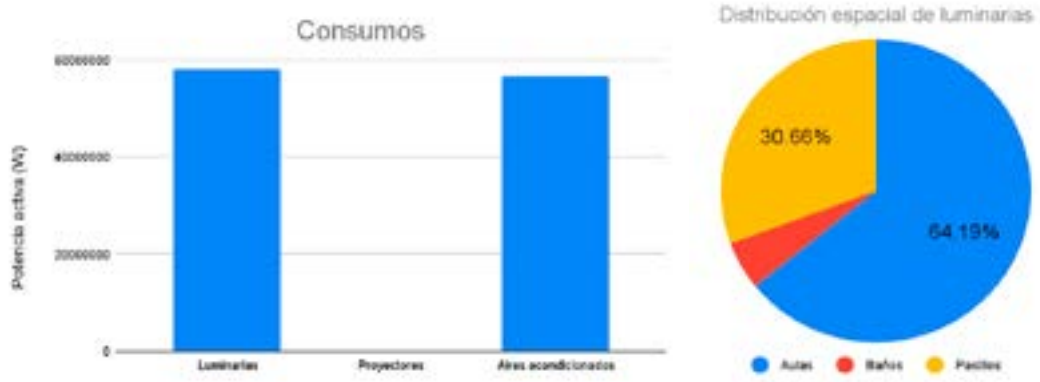


Figura 1. Distribución de los consumos según equipamiento y distribución espacial de luminarias.

Con el objeto de determinar el nivel de iluminación en los diferentes sectores, se realizaron mediciones con un luxómetro en aulas, pasillos y halls de estudio. Contrastando los valores obtenidos con los indicados por la referencia [1]. Se comprobó que algunos espacios correspondientes a aulas y pasillos no poseen la iluminación mínima indicada en [1].

Por otro lado, se conectaron desde el 18/08/2023 al 15/09/2023, dos equipos analizadores de redes, ver Fig. 2, para medir la calidad de servicio y potencia en el tablero principal del departamento y en la entrada de uno de los grupos de trabajo de la FI (IITREE). Los datos analizados corresponden a la diferencia entre la energía consumida por el DE y la consumida por el IITREE, que conforman el caso base de estudio.



Figura 2: Analizadores de redes.

Adicionalmente, se colocó un sensor de movimiento en un pasillo, asociado al mismo un registrador de eventos PENTACOM, lo que permitió registrar la circulación de

personas por el mismo, registrando el tiempo en que el mismo se encuentra inactivo.

A partir del análisis de los datos mencionados, se realizaron perfiles de carga de la potencia demandada, se controlaron los valores de potencia pico, energía, factor de potencia, tensiones, corrientes, desbalances en tensión y corriente y contenido armónico.

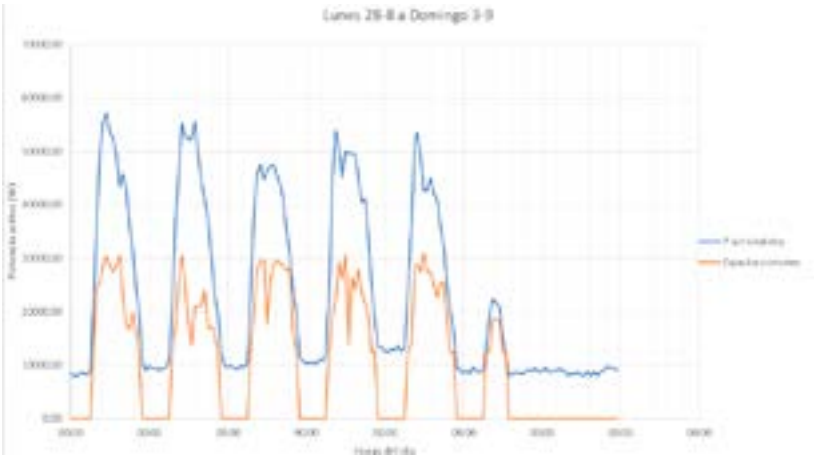


Gráfico 1. Perfil de carga de todo el departamento (azul) vs perfil de carga de potencia estimada en espacios comunes (naranja) en una semana típica.

A partir de las mediciones y relevamientos realizados, se contrastó un perfil de carga de la potencia estimada en espacios comunes contra la potencia medida en todo el departamento, ilustrado en el Gráfico 1. La potencia estimada en espacios comunes se formó a partir del conocimiento de los tiempos de encendido y apagado de luminarias de pasillos y baños, y los tiempos de uso de aulas, según los horarios de clase. Se puede comprobar que los espacios comunes representan aproximadamente un 50 % de los consumos habituales del DE.

Por otro lado, dado que variables como la distorsión armónica y el desbalance de cargas son magnitudes a tener en cuenta en una evaluación de EEE, las mismas fueron consideradas. Si bien se encontró que algunos valores medidos se encuentran fuera de lo recomendado por la normativa de referencia [4], no se perciben multas por ello. Las pérdidas estimadas, debido al contenido armónico y desequilibrios de cargas no resultan significativas.

5. Resultados y discusión: Oportunidades de mejora

Tras los análisis realizados, considerando que la iluminación constituye una parte significativa del consumo total en el edificio, se han formulado diversas propuestas, separadas en tres ejes temáticos. El primer eje aborda aspectos técnicos de la instalación, consiste en una serie de medidas activas. El segundo eje aborda aspectos sociales, vinculados a la concientización de la EEE a los usuarios del edificio. El tercer eje abarca una propuesta de gestión que permitiría desarrollar de forma correcta, cíclica y sostenida en el tiempo la optimización de la EEE.

Eje Técnico

Se presentan cuatro medidas de eficiencia no excluyentes entre sí organizadas en función del ahorro energético que generan. La primera y cuarta medida abordan un problema común: las aulas de la planta baja iluminan sus espacios durante toda la jornada, ya que el control de estas luces está centralizado en un tablero general. Por ende, estas acciones buscan garantizar que las luces estén activas únicamente durante las horas de clase.

La primera medida consiste en la incorporación de un interruptor general para la iluminación en cada anfiteatro. Considerando que cada uno presenta una potencia instalada de 2130 W, esta medida generaría un ahorro de 963 kWh al mes, equivalente al consumo promedio de tres hogares [2].

La segunda medida consiste en la incorporación de sensores de movimiento en los pasillos. La potencia total de las luminarias de dichos espacios es de 1610 W. Por medio de las

mediciones realizadas por el Registrador de eventos mencionado, se concluye que si las luces del pasillo se controlan con el sensor de movimiento se obtendría un ahorro de energía de 456 kWh al mes. Dicha medida se implementó como prueba piloto en uno de los pasillos más transitados durante el desarrollo del presente trabajo.

La tercera medida consiste en la incorporación de tarjetas en las aulas, las cuales interrumpen el suministro de energía eléctrica si la misma no es insertada en un tarjetero, ver Fig. 3. Se realizó una prueba de control con tarjetas en un aula (E17) durante el desarrollo del presente trabajo obteniéndose resultados exitosos. Se calcula que al implementar esta medida en al menos tres aulas se puede obtener un ahorro de 162 kWh por mes. Para la implementación efectiva de esta medida, la propuesta consiste en vincular las tarjetas físicamente a las llaves de las aulas. De tal modo, los docentes retirarían de mayordomía las llaves del aula con la tarjeta de iluminación incorporada.

La cuarta medida consiste en realizar un control de la iluminación dependiente de la intensidad de la iluminación natural de los espacios. Se realizó una prueba piloto en un hall del segundo piso, el control se implementó mediante un Arduino, un fotorresistor y un relé. El fotorresistor envía una señal al Arduino, el cual activa un relé permitiendo que se enciendan las luminarias, en función del valor de iluminación natural presente. El prototipo implementado se presenta en la Fig. 4. Se implementó de forma tal que, si la iluminación medida es mayor a 500 Lux, se abren los contactos del relé y se apagan las luminarias del hall. La potencia instalada en el hall es de 600 W. Se estimó que las luces se apagan entre las 10:00 y 18:00, dependiendo de la época del año, lo cual generaría un ahorro de energía de 118 kWh por mes.



Figura 3. Tercera medida: implementación tarjetero.



Figura 4. Cuarta medida: prototipo control de iluminación por programación de un Arduino con una fotorresistencia como sensor.

Eje Social

Todas las medidas detalladas anteriormente son compatibles con un esquema de concientización y capacitaciones que se propone realizar con los docentes, no docentes y estudiantes que concurren al edificio.

En el marco de la concientización de la EEE, se propone colocar una pantalla en el hall principal de acceso al DE en la que se exhiban en tiempo real las variables eléctricas más relevantes de la instalación, utilizando un dispositivo de medición Siemens PAC3220 y el software Sentron Powermanager. Las mediciones que se exhibirían serían: tensión, corrientes, potencia, factor de potencia, frecuencia, distorsión armónica, entre otras. En la Figura 5 se ilustra el diseño propuesto para dicha pantalla.



Figura 5. Esquematización de pantalla en hall de entrada del DE con variables de interés en tiempo real.

Sumado a estas variables, se incorporaría una curva de carga de la instalación alternando su vista por día y por semana. Por último, a esta pantalla se le agregaría una

función que muestre la cantidad de CO2 emitido durante un periodo determinado, con el objeto de concientizar acerca del impacto ambiental del consumo de energía.

Eje de gestión

Considerando que se concibe la EEE como un proceso cíclico que implica el diagnóstico de la situación actual de la instalación, la planificación y ejecución de medidas, seguidas por el análisis de los resultados y la propuesta de posibles mejoras, se considera necesario adoptar una medida desde la administración de la FI que permita la continuidad de este ciclo de trabajo de forma sostenida en el tiempo. Se sugiere la instauración de un comité especializado en EEE, cuya responsabilidad recaería en continuar con las medidas implementadas, evaluar su impacto en el transcurso del tiempo y perfeccionar las acciones tomadas de manera continua.

Análisis económico

Para el análisis económico se estudiaron las medidas del eje técnico buscando una rentabilidad y viabilidad en su implementación en el plazo de cuatro años. No se analiza la inversión realizada en las medidas de los demás ejes por que se suponen que atraen beneficios indirectos en materia social y económica. Se consideró una tasa de interés anual (TNA) del 118%, se considera la variabilidad de concurrencia en el edificio durante el año y un valor de energía constante en los años considerados.

Se analizó el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) de las medidas, resultó que las medidas 1, 3 y 4 resultan rentables y viables económicamente. Por otro lado, segunda medida no resulta viable ni rentable en el período considerado. Sin embargo, aplicando todas las medidas técnicas en simultáneo, el proyecto resulta rentable y viable.

Análisis Energético: Análisis en base a indicadores de desempeño energético

En cuanto a un análisis energético, para la cuantificación del ahorro energético de las medidas propuestas, se definen Indicadores de Desempeño Energético (IDEn), tomando como referencia la norma ISO 50001:2018 [5]. Siendo que el edificio es una institución educativa, se definieron los siguientes IDEn:

-$IDEn_1$ (kWh/m^2 - semana): indica la cantidad de energía semanal por unidad de superficie.

-$IDEn_2$ (kWh/estudiantes - semana): indica la cantidad de energía semanal por la capacidad de las aulas del edificio.

El $IDEn_1$es en base a la superficie del edificio siendo 10400 m^2 y el $IDEn_2$ es en base a la capacidad de las aulas del edificio, que se considera una capacidad de 1415 estudiantes en total. Siendo la línea base de energía la situación actual del edificio, se calcularon los indicadores para la situación base, implementando las medidas individualmente y un indicador que cuantifique la implementación de todas las medidas en simultáneo.

En la Figura 6 se observan los dos IDEn calculados para cada medida, al ser más pequeños que la situación actual esto significa en una mejora en el desempeño energético de la del edificio, siendo el de mayor reducción en el cual todas las medidas son implementadas.

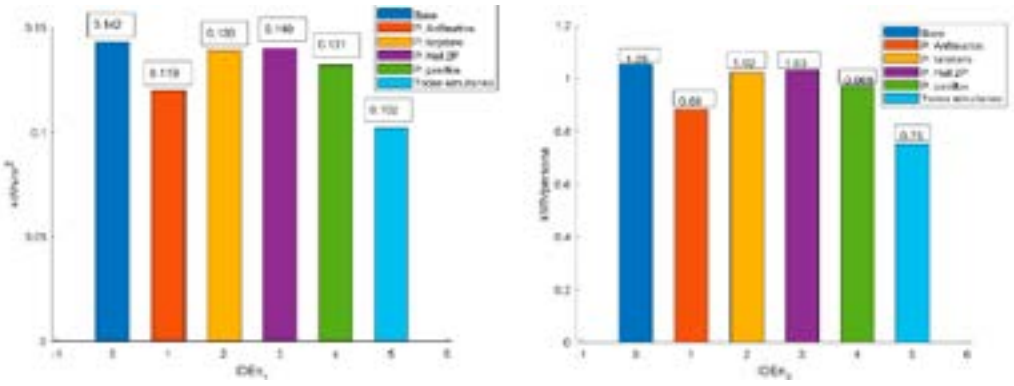


Figura 6. Indicadores de desempaño energético

Análisis del CO2 no emitido

En la siguiente tabla se muestran la cantidad de CO2 no emitido por mes con cada medida, con una comparativa para poder materializar el efecto de ellas. La relación de CO2 por kWh generado de energía eléctrica primaria, se extrajo de la norma AEA 90364-8:2019[3], 1 kWh= 0,5 kg de CO2.

Tabla I: CO2 no emitido por cada medida

Medida	CO2 no emitido por mes (kg)	CO2 emitido por un auto a nafta ida y vuelta a Mar del Plata con un consumo de 12km/lt (kg)	Viajes a Mar del Plata
1	481.4	141	3.41
2	228.1	141	1.62
3	81.4	141	0.58
4	58.8	141	0.42

6. Conclusión

El edificio del DE enfrenta desafíos energéticos considerables, especialmente en términos de iluminación ineficiente y consumo excesivo. Las propuestas presentadas, centradas en la optimización de la iluminación y la concientización de los usuarios, demuestran ser financieramente viables y ofrecen mejoras significativas en el desempeño energético. La creación de un comité de EEE se propone como una medida crucial para mantener y mejorar continuamente estas acciones. La implementación conjunta de las propuestas muestra un impacto positivo, no solo en los costos operativos sino también en la reducción de emisiones de CO2, destacando la importancia de abordar la eficiencia energética en entornos educativos.

La ejecución de estas propuestas posee un impacto social, económico y ambiental significativo. Al trabajar en una institución pública con fines educativos, se reconoce que estas propuestas influyen directamente en la calidad de la educación proporcionada a los estudiantes y en el entorno de enseñanza de los docentes. Los ahorros obtenidos en una institución pública representan la oportunidad de redirigir recursos hacia otras iniciativas educativas, aprovechando el trabajo de desarrollo que se lleva a cabo en la facultad diariamente.

Es importante destacar que las propuestas formuladas en este trabajo abordan problemas identificados en uno de los edificios de la FI-UNLP. El estudio realizado en este edificio es replicable en otros edificios tanto dentro de la facultad, como otros de características similares. Además, teniendo en consideración que la FI contrata en MT, teniendo así un costo de energía menor, estas medidas serían aún más rentables en edificios que contrata BT, ya que la tarifa tiene mayor costo.

7. Referencias:

[1] UNE-EN 12464-1:2022. “Luz e iluminación Iluminación de los lugares de trabajo Parte 1: Lugares de trabajo en interiores”.

[2] ¿Cómo calcular el consumo energético? (2018, 20 noviembre) LA NACION. Extraído de: https://www.lanacion.com.ar/economia/como-calcular-consumo-energetico-nid2192382/#:~:text=Un%20hogar%20promedio%20consume%20entre,los%20siempre%20presente%20aires%20acondicionados

[3] AEA 90364: 2019. “REGLAMENTACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN INMUEBLES”. PARTE 8. Sección 1: Requisitos generales de eficiencia energética.

[4] Resolución ENRE 0099/1997. Boletín Oficial n° 28.583, martes 11 de febrero de 1997, p. 77. Anexo A. Ente Nacional Regulador de la Electricidad.

[5] ISO 50001:2018. “Energy management systems. Requirements with guidance for use”.

ESTUDIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA EN LA PLANTA DE ALIMENTOS 'PAIS' DE LA UNLP

Arnera, Patricia L.* Wall, Carlos A.* Almada, Santiago**
Grilauskas, Zoe ** Fanelli, Malena S.** Colombo, Renzo**

*IITREE-LAT-FI-UNLP
48 y 116. La Plata. Buenos Aires. Argentina caw@iitree-unlp.org.ar

**FI-UNLP
1 y 47. La Plata. Buenos Aires. Argentina

Palabras Claves:

Eficiencia energética, relevamiento, mediciones, oportunidades de mejora, impacto social.

Introducción

La eficiencia energética es una de las principales herramientas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo tanto, es fundamental su estudio y aplicación. En el marco del *Programa Regional Siemens Smart Infrastructure 2024*, se propuso desarrollar un estudio del proceso productivo y la identificación de técnicas que permitieran optimizar los consumos energéticos de la Planta de Alimentos para la Integración Social (PAIS) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

La planta PAIS es una instalación industrial que cuenta con 1500 m^2 cubiertos. Se encuentra en un predio de 60 hectáreas que es propiedad de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, en C. 169 y esquina 69, el mismo es compartido por varias dependencias.

Durante el proyecto se desarrollaron reiteradas visitas a la instalación de la planta PAIS para entender cómo funcionaba el proceso productivo, mediante entrevistas realizadas al personal, así como también, se realizaron relevamientos de equipos y mediciones. Las cargas fundamentales de la planta son motores monofásicos y trifásicos. Se obtuvo una noción del comportamiento del consumo eléctrico y la curva de carga eléctrica.

Se utilizaron dos equipos para llevar a cabo las mediciones de los distintos parámetros eléctricos y ambos fueron conectados en el centro de transformación de *13,2/0,4 kV* del predio. Por un lado, se empleó un instrumento principal que relevó el consumo de la planta de alimentos y, por otro lado, un instrumento que relevó el consumo de todo el predio.

Las variables medidas y registradas durante el proceso permitieron realizar curvas de carga representativas tanto del predio como de la planta PAIS, desarrollar un análisis de calidad de servicio con relación a emisiones de componentes armónicas de corriente y de tensión, estudiar el desbalance de cargas entre fases, evaluar el peso de las pérdidas en el alimentador de la planta, entre otros estudios de interés.

Finalmente, en función de la información que se obtuvo durante las distintas etapas, se elaboró la línea de base energética eléctrica, lo que permite conocer el estado actual de la planta. Se plantearon no sólo propuestas técnicas sino también sociales que permitieran un ahorro de energía y la promoción de la eficiencia energética. Algunas de las medidas que fueron desarrolladas durante el proyecto consisten en distribuir las cargas para balancear las fases, compensar el $cos\ \varphi$ de la planta, colocar sensores de movimientos que optimizaran el uso de las luminarias, incorporar un medidor propio para conocer el consumo de la planta y, optimizar el uso de los compresores y equipos de refrigeración que son elementos de grandes consumos.

Cabe destacar que, un ahorro de energía para la planta PAIS con su alta connotación social, permite un incremento en la producción de raciones, como también, en las becas de trabajo que se brindan.

Descripción de la planta PAIS

La Planta de Alimentos para la Integración Social se desarrolló en función de tres pilares característicos:

- SOCIAL: Abastecer las sedes del Comedor Universitario de la UNLP y distintos lugares carenciados;
- EDUCATIVO: Implementar el proceso productivo y desarrollar análisis de calidad realizados por estudiantes y docentes;
- ECONÓMICO: Promover la actividad productiva del cinturón hortícola platense.

Para llevar a cabo los objetivos de la planta, se establecieron dos sectores en la instalación, uno en la planta baja del edificio y otro en la planta alta del mismo.

- PLANTA BAJA: Implementación del proceso productivo por medio de seis (6) salas dispuestas de forma consecutiva con la producción del alimento deshidratado: Sala 1 – Recepción, Sala 2 – Zona Sucia, Sala 3 – Zona Intermedia, Sala 4 – Zona Limpia Húmeda, Sala 5 – Zona Limpia Seca, y Sala 6 – Zona Mezclado, Condimentado, Envasado.
- PLANTA ALTA: Conformado por el aula, las oficinas y el laboratorio, donde se verifica la calidad del producto respecto a aportes nutricionales.

Determinación de la línea de base energética eléctrica

1° Etapa – Relevamiento

La etapa se inició durante la primera visita a la planta, donde se priorizó conocer cómo funcionaba el proceso productivo a través de las explicaciones brindadas por el personal durante el recorrido por cada una de las zonas.

Luego, durante la segunda visita se realizó el relevamiento e identificación de todas las cargas presentes en la instalación. Se clasificaron los equipos, considerándolos como cargas o motores, y se registró la cantidad, la potencia nominal, además de otros parámetros eléctricos relevantes.

Finalmente, por medio de esta etapa se estimó la potencia pico instalada de la planta, la cual resultó del orden de 106.7 kW. Además, fue clave para identificar algunas de las problemáticas a enfrentar durante el proyecto.

La planta PAIS no cuenta con un medidor del consumo de energía eléctrica. El único medidor operativo es el dispuesto por la distribuidora (EDELAP) para la facturación, el cual registra el consumo del predio, sin distinguir el consumo por dependencia. Por otra parte, se visualizó un mal funcionamiento de las luminarias del proceso productivo, causando molestia visual a los operarios.

2° Etapa – Medición

Para desarrollar una propuesta de impacto, la etapa de medición fue sumamente fundamental. Entonces, para realizar mediciones relevantes, se inició identificando el punto de conexión óptimo para los instrumentos de medición empleados, para lo cual se tuvo en cuenta que:

- La distribuidora clasifica al predio como un Gran Usuario en MT, tarifa T3;
- El predio se abastece por medio de un centro de transformación de 600 kVA con una relación de 13,2/0,38 kV.

Entonces, a partir de las consideraciones mencionadas, se presentó un esquema unifilar simplificado, ver Figura 1, para visualizar los puntos de conexión y qué equipo se empleó en cada uno.

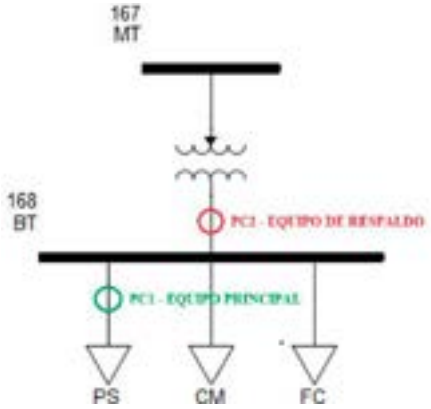


Figura 1. Unifilar y puntos de conexión.

Los equipos utilizados pertenecen a la FI. Se utilizó un equipo de respaldo para registrar el consumo del predio y que fuera posible realizar un análisis de facturación, mientras que, el equipo principal registró el consumo de la planta PAIS, cuyos datos fueron cruciales para establecer la línea de base energética eléctrica.

- (PC1) PRINCIPAL: Sentron PAC4200, Siemens junto con los TI de núcleo abierto (400/5 A).
- (PC2) RESPALDO: Power Master XL, Metrel.

Para emplear el equipo de Siemens, dispuesto en la valija de medición que se realizó para llevar a cabo el presente proyecto, se requirieron además tres transformadores de corriente (TI) de núcleo abierto y relación 400/5 A. Por otro lado, el equipo requiere un software denominado Powermanager, el cual es una herramienta de registro y análisis, que debe ser instalado en una PC que a su vez almacena los registros de medición. Ambos equipos deben contar con acceso a internet para que el proceso de medición-registro sea llevado adelante con éxito.

Asimismo, para poder monitorear las mediciones a distancia, desde la FI UNLP, se descargó una aplicación de acceso remoto en la computadora denominada *Rustdesk*. Esta aplicación permitió ingresar a la PC y verificar que el software *Powermanager* se encontrara registrando correctamente los datos relevados. *3° Etapa – Análisis de los Registros*

Durante la presente etapa se llevó a cabo el estudio y análisis de los datos registrados durante el periodo de medición, para lo cual fue fundamental el uso de las herramientas dispuestas por el software *Powermanager* así como la utilización del Excel. De manera general, la etapa tiene como fin obtener y evaluar los siguientes ítems:

- Calidad del Servicio Eléctrico

Desbalance de tensión

El estudio del desbalance de tensión fue esencial ya que se trata de un fenómeno que provoca el aumento de las pérdidas en las máquinas rotantes, lo que puede desencadenar un sobrecalentamiento significativo que causaría daños en los motores eléctricos. Siendo que la planta PAIS está constituida principalmente por motores, se requirió evaluar el desbalance de tensión para indicar si se debía realizar un *derating*. El *derating* consiste en la operación de la máquina rotante por debajo de su potencia nominal de manera que las corrientes resultantes no ocasionen un sobrecalentamiento, aunque esto implica una pérdida de rendimiento.

Para realizar la evaluación se emplearon dos factores. El primero se planteó a partir de la propia definición de desbalance de tensión [1],

$$K_{máx} = \left|\frac{\dot{U}_-}{\dot{U}_+}\right|_{máx}$$

Mientras que, el segundo factor consiste en [2]

$$K = \frac{Max(|U_1 - U_{med}|; |U_2 - U_{med}|; |U_3 - U_{med}|)}{U_{med}} * 100\ [\%]$$

Se obtuvo la curva de derating en función del porcentaje de desbalance de la tensión [3], mediante la cual se procedió a evaluar el máximo desbalance de tensión del usuario, el cual se encuentra por debajo del 1%. Se concluyó que no era necesario realizar un *derating* sobre los motores eléctricos.

Emisión de componentes armónicas y distorsión total en la corriente y en la tensión

La Tasa de Distorsión Total (TDT) o Total Harmonic Distortion (THD) es un parámetro que permite ponderar el contenido armónico total tanto en tensiones como en corrientes. A nivel nacional, República Argentina, dichas perturbaciones están reguladas por el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), quien establece los máximos límites admitidos para tensión [4] y para corriente [5], respectivamente.

Siendo que el estudio se llevó a cabo sobre un usuario tipo T3 de MT, la resolución establece los límites admitidos a través de valores porcentuales. Tanto la tensión como la corriente se obtuvieron a partir de la potencia contratada por el usuario y considerando un $cos\ \varphi = 0.85$. Los resultados son presentados en la Figura 2 y Figura 3.

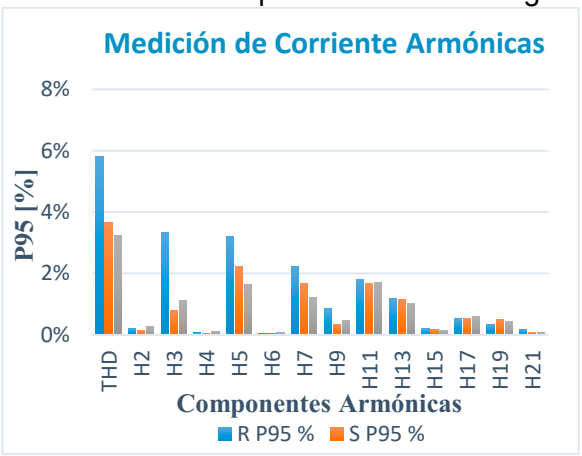


Figura 2. Gráfico de barras del percentil 95% para cada fase y componente armónica de la corriente.

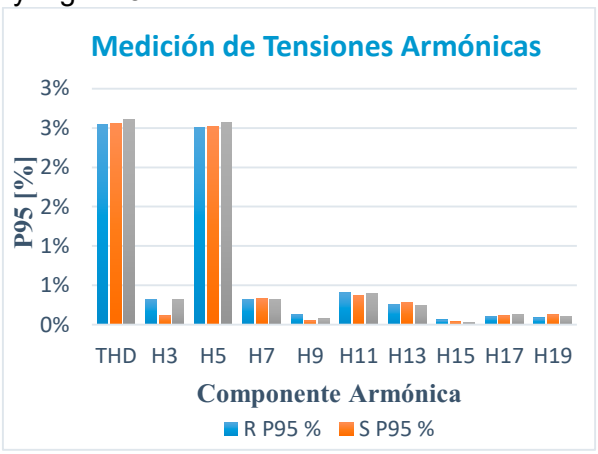


Figura 3. Gráfico de barras del percentil 95% para cada fase y componente armónica de la tensión.

Finalmente, se concluyó que el usuario no será penalizado por el contenido de componentes armónicas ni en la corriente ni en la tensión.

Factor de potencia y $cos\ (\varphi)$

Este análisis comenzó a raíz de observar lo que ocurría el día 30 de septiembre de 2024 tanto con el cos φ como con la potencia.

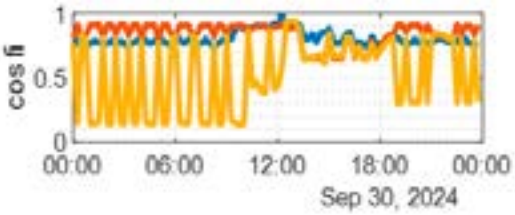


Figura 4. Gráfico de cos φ para el periodo especificado.

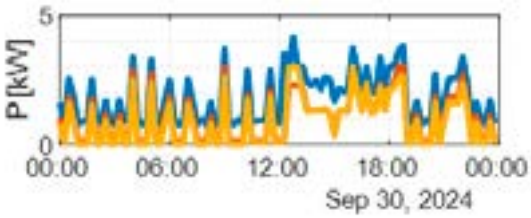


Figura 5. Gráfico de la potencia activa para el periodo especificado.

Alrededor de las 18:00 hs, el cos φ de las tres fases representadas en color rojo, azul y amarillo se mantenía cercano a la unidad. Esto se condice al observar lo que ocurre con la potencia. En el mismo horario, las tres fases absorben la misma potencia. Mientras que, durante el resto del día, se observa como varía el cos φ entre fases, al igual que su potencia, alcanzando valores menores a 0.5, en el caso de la fase L3 (color amarillo). El análisis, comenzó tomando los valores promedio del cos φ para las fases L1 y L2 y hallando el promedio de estos, sin considerar la fase L3. Este procedimiento se realizó debido a que la fase L3 tenía un valor que no resultaba representativo a causa del error con el que era medido.

A partir del cos $\varphi_{prom} = 0.82$ considerando una tensión promedio de 227 V, se halló el valor de corriente por fase. A estos valores de corriente para cada intervalo de tiempo, se los comparó con el valor de corriente considerando un cos $\varphi = 0.95$ deseado, con lo cual se concluyó que la corriente se reduce en un 13.7% al compensar.

- Pérdidas y desbalance de cargas

En primera instancia se planteó la definición de pérdidas eléctricas por medio de su expresión,

$$P_{perd} = I^2 * R_{acometida}$$

donde considerando una $R_{acometida} = 0.06\,\Omega$ se definieron las pérdidas para cada fase. Luego, se estimó la corriente de neutro, considerando que era del orden del 20% del valor de la corriente de fase, con el fin de calcular la potencia total.

Por último, se plantearon dos escenarios, el primero, repartir equitativamente las cargas por fase y el segundo, compensar el cos φ.

Se concluyó que, llevando a cabo ambas medidas en simultáneo, se obtiene una reducción en las pérdidas del orden del 55%.

Oportunidades de mejora

Propuestas técnicas

En función de los resultados que se obtuvieron durante el análisis de los datos registrados durante el periodo de medición, se realizaron una serie de propuestas técnicas con el fin de optimizar el funcionamiento de la planta, las cuales se presentan a continuación:

- Balance de cargas;
- Colocación de sensores de movimiento;
- Instalación de instrumentos de medición;
- Compensación;
- Modificaciones en el uso de compresores;
- Climatización;
- Cámaras frigoríficas.

Impacto social

Por otro lado, respecto al impacto social característico de la planta de alimentos, se propuso como medida básica para los operarios, estudiantes y docentes un '*Programa de capacitación y concientización'* basado en el uso consciente y optimizado de la energía.

Eje de gestión

Se propuso incorporar a la planta un sistema de gestión que se dedique a establecer los sistemas y los procesos que permitan llevar a cabo un mantenimiento predictivo eficaz sobre los distintos equipos e instalaciones. Este sistema debe estar acompañado de un sistema de control que, a su vez, aumenta la seguridad del sistema.

Impacto ambiental

Respecto al impacto ambiental, una vez aplicada la totalidad de las propuestas técnicas previamente mencionadas, se estimó una reducción de las emisiones de CO_2 equivalentes a *2 viajes* desde La Plata a Capital Federal en helicóptero al año.

Análisis social y económico

Aplicando las propuestas ya mencionadas, a través de la evaluación económica de cada una y de todas en conjunto, se concluyó que se podrían pagar 350 sueldos más de becarios que desarrollan sus labores en la planta, mientras que, se podrían producir 47847 raciones adicionales por año.

Conclusiones

De manera general, resulta fundamental destacar la experiencia adquirida durante el proceso de estudio, análisis y resolución del presente proyecto para cada uno de los integrantes del equipo de trabajo. Durante el mismo se abordaron distintos aspectos vinculados a la eficiencia energética, con un enfoque principalmente eléctrico, se comprendió la operación de los equipos de medición, así como el funcionamiento de sus componentes como software, se investigó sobre la aplicación y utilización de programas de gestión de energía, entre otros.

Como resultado, se propusieron una serie de medidas de eficiencia energética viables tanto técnica como económicamente, con el fin de optimizar el funcionamiento de la planta. Las medidas abordan los problemas descubiertos durante el análisis del registro de mediciones a través de soluciones técnicas, sociales y de gestión.

Se obtuvo que la implementación conjunta de las propuestas representa un impacto positivo, no solo en los costos operativos sino también en la reducción de emisiones de CO_2. Los ahorros que se pueden obtener representan una oportunidad de redirigir recursos hacia una mayor producción o aumentar la cantidad de becarios, llegando así a más personas. Además, se destaca la importancia de abordar una temática como la eficiencia energética en entornos educativos.

Bibliografía

[1] IEEE 1993. “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. ANSI-IEEE Std.141, 1993”.

[2] IEC-61000-3-13:2008. “Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems”.

[3] NEMA 2003. “Motors and Generators. National Electrical Manufacturers Association of USA. Standard MG1, Section 14.36.2”.

[4] Resolución ENRE 0099/1997, “Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones”.

[5] Resolución ENRE 184/2000, “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico”.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PARA UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGIA BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE.

Zappettini, Mateo; Anderson, Jorge L.; Puleston, Paul F.

Instituto LEICI, UNLP-CONICET. Dept. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 (B1900ASH), La Plata, Buenos Aires, Argentina
e-mail: mateo.zappettini@alu.ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

En un contexto marcado por la urgente transición hacia energías renovables, las pilas de combustible de hidrógeno (PCH) emergen como una tecnología atractiva debido a su alta eficiencia, operación sin emisiones locales y capacidad de integración en sistemas de energía híbridos (SEH) [1]. Sin embargo, su comportamiento altamente no lineal y su sensibilidad a variaciones en parámetros como la temperatura, la humedad y la presión de los gases reactivos, dificultan la aplicación de técnicas de control convencionales y demanda el desarrollo de estrategias avanzadas para garantizar un desempeño robusto y confiable [2]. Además, la integración de las PCH en SEH implica enfrentar desafíos adicionales, tales como las amplias variaciones de tensión en el *stack*, su respuesta lenta y su incapacidad para recuperar el exceso de energía, lo que ha motivado su combinación con dispositivos de almacenamiento eléctrico, como baterías y supercapacitores. Asimismo, la utilización de convertidores DC/DC para mantener un bus de tensión constante y regular el flujo de energía resulta esencial para maximizar la eficiencia de estos sistemas [3].

En este marco, el presente trabajo se orientó al desarrollo, implementación y evaluación experimental de diversas estrategias de control sobre una plataforma diseñada para ensayar SEH basados en PCH (ver Fig. 1). El objetivo fue contribuir al diseño y evaluación de estrategias avanzadas de control que permitan superar las barreras técnicas, promoviendo la integración efectiva de las PCH en redes híbridas de energía.

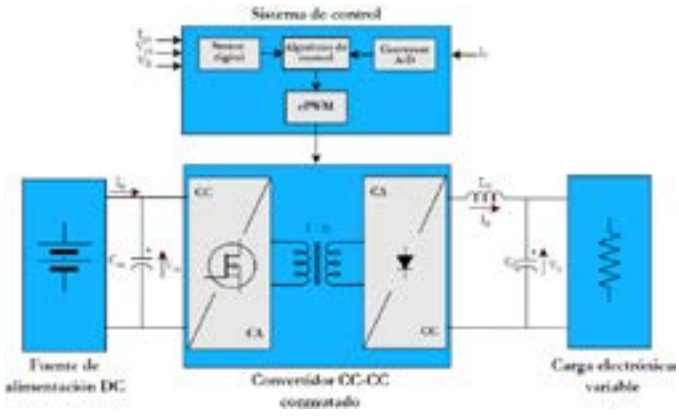


Figura 1: Diagrama de bloques de la plataforma experimental de evaluacion de modulos de PCH.

2. Descripción de la plataforma

La plataforma experimental emplea un **convertidor DC/DC** de tipo puente completo (Fig. 2). Al tratarse de un convertidor aislado incorpora una etapa intermedia en corriente alterna que, mediante un

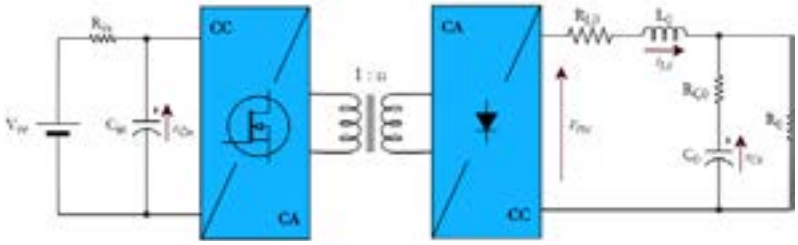


Figura 2: Diagrama esquemático del convertidor aislado tipo puente completo con carga resistiva.

transformador de alta frecuencia, permite alcanzar una ganancia de tensión elevada. El convertidor consta de una etapa inversora monofásica, conformada por cuatro llaves en una configuración de puente H, cuya salida se conecta al primario del transformador; en el secundario, la señal se rectifica y filtra antes de ser entregada al bus de corriente continua. En este trabajo, la modulación del convertidor se realizó mediante la técnica de desplazamiento de fase, la cual reduce el estrés sobre las llaves de conmutación.

El **sistema de control**, que constituye el núcleo de la plataforma, se implementa a través de un controlador digital de señales (DSC), modelo TMS320F28335 de Texas Instruments. Este adquiere datos de diversos sensores, procesa la información y genera las señales PWM necesarias para el accionamiento del convertidor. En particular, la medición de la corriente de salida, una variable crítica para determinar la potencia entregada al bus de continua, se realizó mediante un sensor de efecto Hall.

La forma de la corriente de salida del convertidor se observa en la Fig. 3. Para calcular su valor medio, se implementó un sobremuestreo de la corriente, que posteriormente es procesado mediante un filtro digital. Durante cada período de conmutación, se tomaron ocho muestras equiespaciadas, y el valor medio por ciclo se obtuvo utilizando un filtro FIR.

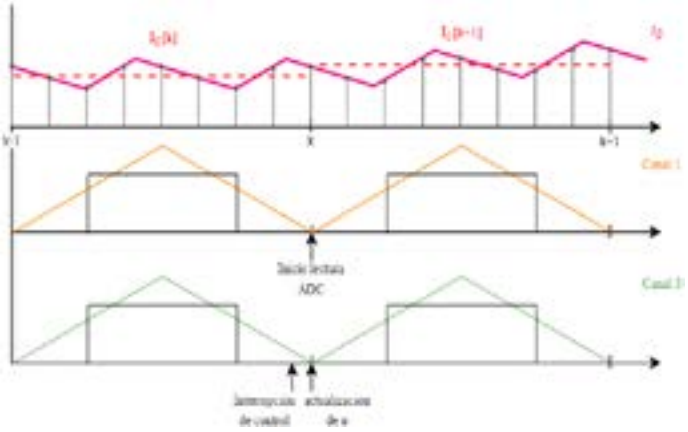


Figura 3: Secuencia de procesamiento y actualización de la acción de control.

Las señales PWM se configuraron en el modo *Up-down-count* con un ciclo de trabajo fijo del 50% y un periodo de 48 µs. Al inicio de cada ciclo del canal 1, se activa una interrupción que inicia la conversión del ADC. Además, una interrupción de usuario, configurada con máxima prioridad y ejecutada 3 µs antes del inicio de cada ciclo, se encarga de procesar la corriente, calcular la acción de control y ajustar el desfasaje entre las señales de comando.

El sistema incorpora también un monitor de potencia LM5056A, que facilita la medición de otras variables relevantes como las tensiones V_{in} y V_0, permitiendo una supervisión integral del sistema. La adquisición del estado de estas variables es fundamental para el desarrollo de las estrategias de control que aprovecha el cálculo de la acción de control equivalente.

Por último, la plataforma se completa con una **fuente de laboratorio** HP 6010A, que reemplaza a la PCH. De esta forma, el enfoque del trabajo se centró en el diseño y evaluación de estrategias de control dentro del sistema experimental. Adicionalmente, una **carga electrónica** programable permite emular diversas condiciones de carga en el bus de corriente continua, facilitando el análisis del sistema en distintos escenarios operativos.

3. Modelado dinámico del sistema experimental

El diseño de una estrategia de control robusta requiere comprender a fondo la dinámica del convertidor. Para ello, se desarrolló un modelo matemático promediado considerando una carga resistiva pura, dado que esta aproximación permite capturar de forma precisa las características dinámicas sin la complejidad que añade la regulación de una carga de tensión constante.

Partiendo del sistema experimental (Fig. 2) se realizaron las siguientes simplificaciones: se asume que el convertidor opera en modo de conducción continua; se consideraron las pérdidas en el inductor L_0, el capacitor C_0 y la resistencia de salida de la fuente V_{cc}; los demás componentes se trataron como ideales; y se presumió que la dinámica del filtro de salida dominaba sobre la del capacitor de entrada. Con estas premisas, se obtuvo un modelo lineal, en el que la tensión de entrada del filtro correspondía al valor medio de la tensión rectificada

a la salida del puente de diodos, expresado mediante la relación de conversión $\bar{v}_{rec} = \text{n}\ \bar{v}_{Cin}$ u. El modelo linealizado se describe mediante su función de transferencia:

$$G(s) = \frac{I_{L0}(s)}{U(s)} \approx n\ v_{Cin.eq} \frac{C_0 R_0 s}{L_0 C_0 R_0 s^2 + [L_0 + C_0\ (R_{L0} + R_0) R_0] s + R_0} \quad (1)$$

Para determinar los parámetros del modelo, se analizó la respuesta a lazo abierto del sistema ante una entrada tipo escalón (Fig. 4). A partir de los datos experimentales, se identificó un modelo de función de transferencia con dos polos y un cero, que fue comparado con la función de transferencia obtenida analíticamente. Por inspección se estimaron los valores de los componentes circuitales, y se corroboraron con mediciones directas. Además, se realizaron pruebas a lazo abierto, variando la corriente y la resistencia de carga R_0, lo que validó la consistencia y robustez de los parámetros identificados.

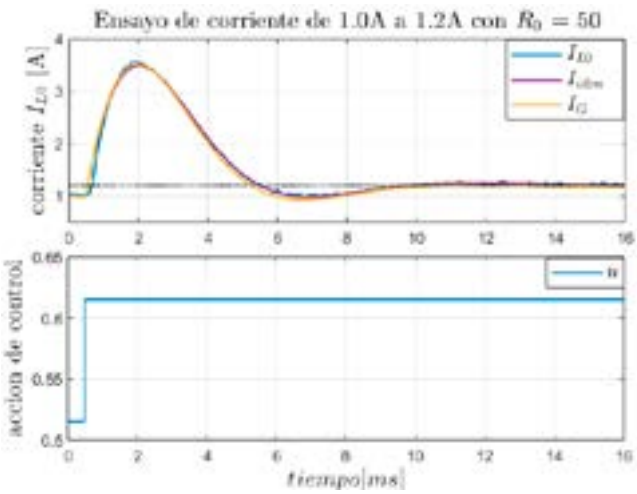


Figura 4: Comparación de datos experimentales (azul) con la simulación del modelo identificado (violeta) y de la función de transferencia de la ec. (1) (amarillo).

4. Diseño de las estrategias de control: Control PI

El objetivo del control consistía en regular la corriente media de salida del convertidor $\bar{\imath}_{L0}$, garantizando un desempeño robusto frente a incertidumbres en los parámetros del sistema y perturbaciones externas. Como primer paso, se implementó un **controlador PI**, esperando que el empleo de técnicas lineales facilite la identificación y corrección de problemas en la implementación, sirviendo además de referencia para comparar y evaluar el desempeño de los métodos de control por modos deslizantes desarrollados posteriormente.

Se diseñaron múltiples configuraciones del controlador PI, con el propósito de evaluar sus respuestas y seleccionar aquella que ofreciera el mejor rendimiento experimental. Inicialmente, se aplicó un método de sintonización estandarizado basado en las reglas de Ziegler-Nichols, empleando la técnica de oscilaciones sostenidas. Luego, se sintonizaron otras configuraciones para explorar diferentes respuestas en términos de tiempo de subida y sobrepico, para las cuales se tuvo en cuenta la presencia de una dinámica lenta inherente al sistema, que lleva a que se establezca por completo alrededor de los 60 ms. Se definieron entonces los parámetros de modo que la corriente de salida alcance y se mantenga en una banda de ±0.05 alrededor del valor de referencia. Este rango se estableció por la precisión del sistema de adquisición de datos, de modo que, una vez que la salida se encuentra dentro de esta banda, se considera que la respuesta se ha estabilizado.

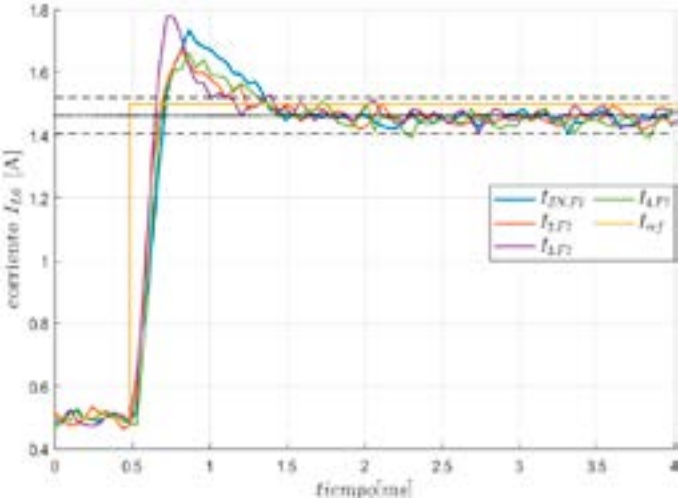


Figura 5: Comparación de la respuesta experimental de los distintos controladores PI.

En la Fig. 5 se comparan sus respuestas experimentales, donde la línea negra discontinua indica los límites de la banda de establecimiento. Los valores cuantitativos de desempeño se resumen en la Tab. 1. Aunque las respuestas experimentales son similares, el controlador 2 (trazo rojo) se distingue por su mejor tiempo de respuesta, menor sobrepico y permanencia dentro de la banda de establecimiento, posicionándolo como la mejor opción de comparación para evaluar las estrategias no lineales.

Controlador	Parámetros de los controladores		Parámetros de respuesta temporal	
ZN	$K_p = 0.126$	$K_i = 294$	$t_{est} = 0.91$ ms	$s_p = 1.74$ A
2	$K_p = 0.170$	$K_i = 275$	$t_{est} = 0.77$ ms	$s_p = 1.67$ A
3	$K_p = 0.200$	$K_i = 345$	$t_{est} = 0.96$ ms	$s_p = 1.78$ A
4	$K_p = 0.138$	$K_i = 240$	$t_{est} = 3.41$ ms	$s_p = 1.66$ A

Tabla 1: Parámetros de sintonización de los controladores PI y métricas de la respuesta experimental del sistema, incluyendo el tiempo de establecimiento (t_{est}) y el sobrepico (s_p) para cada caso.

5. Diseño de las estrategias de control: Control por modos deslizantes

El **control por modos deslizantes** (MD) es una técnica no lineal robusta frente a incertidumbres y perturbaciones externas, que fuerza la dinámica del sistema hacia una superficie invariante en el espacio de estados, conocida como **superficie de deslizamiento** ($\sigma(x) = 0$) [4]. Una vez alcanzada, la evolución del sistema queda determinada únicamente por las propiedades de dicha superficie, lo que permite una actuación eficaz frente a variaciones en los parámetros y perturbaciones. Otra característica para destacar es que su implementación resulta relativamente sencilla en comparación con otras técnicas de control.

Inicialmente se empleó la ley de control discontinua tradicional, que asigna valores máximos y mínimos (u^+ y u^-) según el signo de $\sigma(x)$, conduciendo a una operación de alta frecuencia, idealmente infinita, sobre la superficie $\sigma(x) = I_{ref} - i_{L0} = 0$. No obstante, esta discontinuidad genera el fenómeno de ***chattering***, es decir, conmutaciones de alta frecuencia que pueden degradar la estabilidad y desempeño del sistema en presencia de limitaciones físicas.

Para mitigar este efecto, se incorporó el **control equivalente** como acción "*feedforward*". Este control se basa en modelar la dinámica del sistema en MD mediante un sistema continuo equivalente, en el que $\sigma(x) = 0$ es un invariante del sistema. Así, se deriva una expresión para u_{eq} que garantiza la permanencia en el modo deslizante, cumpliendo con las condiciones de invarianza [5]: $u_{eq} \approx \frac{R_{L0}\, I_{ref} + \bar{v}_{C0}}{n\, \bar{v}_{Cin}}$. Además, la gran variación de u_{eq} y su lenta respuesta, asociada a la dinámica de las variables internas, sugiere que la elección de unos valores fijos de u^+ y u^- no es la mejor alternativa para su implementación en el sistema experimental. Esto resalta más la necesidad de aprovechar el cálculo de la u_{eq} y combinarla con el control aportado por MD mediante: $u(t) = u_{eq}(t) + u_{sm}(t)$, donde u_{eq} acerca el sistema a la región de operación deseada ($\sigma(x) = 0$), y u_{sm} acelera la convergencia y mejora la robustez frente a perturbaciones e incertidumbres en los parámetros.

Esta técnica permite definir una acción simétrica: $|u^-| = |u^+| = k_s$, con un valor reducido de k_s para disminuir el *chattering* y mejorar la precisión. No obstante, la reducción de la amplitud del control afecta a la robustez y degrada la respuesta transitoria, lo que evidencia un compromiso entre la mitigación del *chattering* y el desempeño global del controlador.

En aplicaciones con convertidores electrónicos, una técnica ampliamente utilizada es la inclusión de **histéresis** en la comparación, reemplazando la superficie ideal por una banda de ancho 2δ. De esta forma, el sistema ya no evoluciona exactamente sobre la superficie, sino que oscila dentro de una banda en torno a ella. Sin embargo, en este caso, la técnica no mejora la respuesta, sino que la degrada debido a las oscilaciones introducidas por la banda.

Otra alternativa consiste en insertar una **capa límite** en torno a la superficie de deslizamiento, de manera que una acción de control continua sustituya a la acción discontinua cuando el sistema se encuentra dentro de dicha capa [6]. Para lograr esto, se emplea la siguiente ley de

control: $u_{sm}(t) = -k_s \frac{\sigma(x)}{||\sigma(x)||+\delta}$, $con\ \delta > 0$. Si bien este enfoque reduce el *chattering*, introduce un error de estado estacionario inevitable y compromete la robustez y precisión del MD según el grosor de la capa límite. Teniendo en cuenta estas características, se adoptó $\delta = 0.05$, equilibrando precisión y reducción de *chattering.*

Por otro lado, se estudió el **control por MD de segundo orden,** que es una técnica ampliamente utilizada para mitigar los problemas de *chattering*, ya que no solo elimina efectivamente estas desventajas, sino que también conserva los características principales del MD convencional. Entre los distintos algoritmos disponibles, el ***super-twisting*** *se* destaca por su eficacia para lidiar con sistemas en presencia de no linealidad fuerte. Este puede interpretarse como una entrada proporcional-integral no lineal que permite un control suave y preciso. Matemáticamente, el algoritmo se describe mediante las expresiones de la ec. (2). Debido a que incorpora un término con efecto integrador, este método logra operar sin la necesidad de incluir u_{eq} aunque su adición puede mejorar el desempeño general.

$$\begin{cases} u_{st}(t) = -\lambda\,|\sigma(x)|^2\,\mathrm{sign}\big(\sigma(x)\big) + \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\alpha\,\mathrm{sign}(\sigma(x)) \end{cases} \quad (2)$$

Entre las estrategias evaluadas, el controlador de primer orden, aunque efectivo, presentó un mayor tiempo de convergencia y oscilación en la corriente. De manera similar, el control por MD con histéresis mostró un desempeño menos eficiente en términos de precisión y tiempo de respuesta. En contraste, el enfoque de conmutación suave mediante una capa límite ofreció resultados prometedores, al lograr reducir el *chattering* y permitir operar con valores más altos de k_s, mejora la respuesta dinámica. Finalmente, el controlador por MD de segundo orden demostró el mejor desempeño global, equilibrando precisión, robustez y rapidez de respuesta, posicionándolo como una solución óptima para aplicaciones que requieren un control de alta calidad. La adición de la u_{eq} refuerza estas ventajas al reducir aún más el tiempo de respuesta.

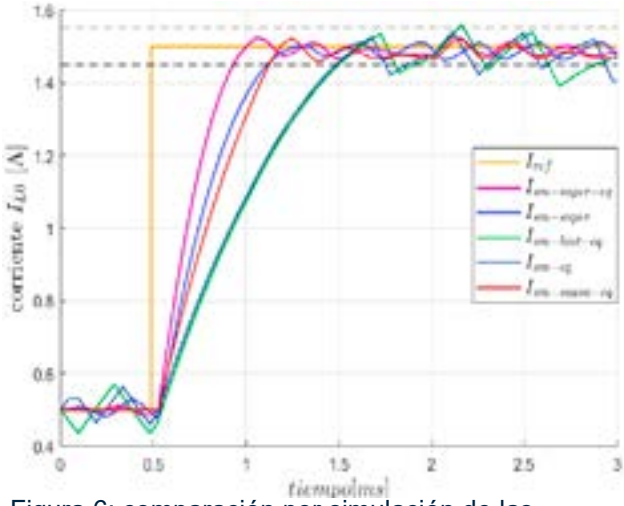


Figura 6: comparación por simulación de las respuestas ante los distintos controladores por MD con acción de control discreta.

6. Evaluación experimental final

En esta evaluación, se excluyen el enfoque suave y el control con histéresis, ya que sus desempeños no superaron al de las alternativas consideradas. En la Fig. 7 se muestran las respuestas experimentales de los controles seleccionados, mientras que la Tab. 2 resume los parámetros clave de su respuesta temporal, lo que en conjunto permite realizar un análisis comparativo detallado.

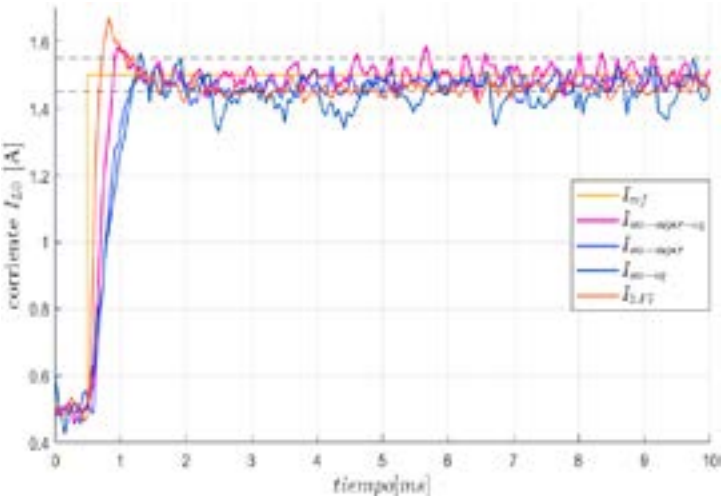


Figura 7: Comparación experimental de la respuesta de los controladores diseñados más destacados.

El control por MD tradicional, pese a presentar un tiempo de convergencia rápido, exhibe un alto ripple y un error acumulado elevado, ya que la salida oscila en torno a un valor que se desvía de la referencia deseada, lo que se

traduce en una menor eficiencia en la regulación. En contrapartida, el controlador PI destaca por su rápido tiempo de subida y ripple moderado, aunque sufre de un sobrepico considerable y un tiempo de establecimiento prolongado.

Por su parte el control *super-twisting* simple, combina un tiempo de convergencia a un valor cercano al de la referencia similar al del PI, con un ripple moderado y un tiempo de establecimiento algo menor. Por último, la variante que incorpora u_{eq} presenta un sobrepico inferior al del PI y un tiempo de convergencia comparable, pero introduce oscilaciones más pronunciadas alrededor del valor de referencia, incrementando el error acumulado.

Controlador	Parámetros de los controladores		Parámetros de la respuesta temporal					
			t_{alc}	Δ	ISE	IAE	ITSE	ITAE
MD	$k_s = 0.018$	$k_{ant} = 0.018$	0.72 ms	0.26 A	$2.83\ 10^{-4}$	$9.29\ 10^{-4}$	$4.16\ 10^{-7}$	$3.79\ 10^{-7}$
MD - hist	$\delta = 0.0168$	$k_s = 0.018$	0.77 ms	0.28 A	$3.34\ 10^{-4}$	$9.98\ 10^{-4}$	$5.25\ 10^{-7}$	$4.12\ 10^{-7}$
Comm. suave	$\delta = 0.05$	$k_s = 0.02$	0.82 ms	0.27 A	$4.42\ 10^{-4}$	$12.0\ 10^{-4}$	$6.02\ 10^{-7}$	$4.55\ 10^{-7}$
ST	$\lambda = 0.06$	$\alpha = 12$	0.67 ms	0.14 A	$2.66\ 10^{-4}$	$6.81\ 10^{-4}$	$2.44\ 10^{-7}$	$2.29\ 10^{-7}$
ST - eq	$\lambda = 0.06$	$\alpha = 12$	0.43 ms	0.17 A	$1.96\ 10^{-4}$	$5.22\ 10^{-4}$	$1.70\ 10^{-7}$	$1.85\ 10^{-7}$
PI	$K_p = 0.17$	$K_i = 275$	0.19 ms	0.11 A	$1.34\ 10^{-4}$	$6.04\ 10^{-4}$	$1.82\ 10^{-7}$	$2.74\ 10^{-7}$

Tabla 2: Parámetros de sintonización de los controladores y métricas asociadas a la respuesta experimental. Se presentan el tiempo de alcance a la banda de establecimiento (talc), el ripple en dicha banda (Δ) y los índices ISE, IAE, ITSE e ITAE.

7. Conclusiones

En el presente proyecto se desarrollaron, implementaron y evaluaron numérica y experimentalmente diversas estrategias de control para un sistema de conversión basado en PCH, utilizando controladores PI y por MD de diferentes características. La comparación permitió identificar ventajas y limitaciones de cada técnica, destacándose la implementación del control PI y del MD de segundo orden como opciones con un desempeño equilibrado.

En particular, el control por MD de segundo orden simple logra un buen compromiso entre rapidez y precisión, con un ripple moderado y un tiempo de establecimiento corto. Por otro lado, la variante con adición de u_{eq}, aunque ofrece resultados alentadores, su implementación óptima requiere mejoras en el sistema de adquisición de los datos de las variables internas, como aumentar la frecuencia de muestreo y mejorar el procesamiento para obtener un valor medio más preciso de la tensión en el capacitor de entrada (V_{Cin}). Además, un análisis más detallado del comportamiento de estas variables podría ayudar a corregir algunas discrepancias entre la implementación real y el modelado matemático.

Los resultados experimentales mostraron una correlación razonable con las simulaciones realizadas, lo que permitió validar parcialmente los modelos empleados. Se evidenció, sin embargo, que las limitaciones del hardware, como la precisión del sistema de sensado y la capacidad de procesamiento del DSC, tuvieron un impacto significativo en el desempeño de los controladores, especialmente en la estimación del valor medio de las variables. Mejorar estos aspectos podría incrementar la estabilidad y precisión en aplicaciones futuras.

Bibliografía

[1] J. Anderson, J. Moré y P. Puleston, “Design and stability analysis of a super-twisting controller for a PS-FBC–based fuel cell module,” *Advanced Control for Applications*, 2019.

[2] C. Kunusch, P. Puleston y M. Mayosky, *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*, 2012.

[3] H. A. Trinh, T. H. V. A. Truong y M. D. Pham, “Comprehensive Control Strategy and Verification for PEM Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2023.

[4] L. Moreno, I. Penarrocha y H. de Battista, *Notas de Curso: Sistemas de Control de Estructura Variable*, 2003.

[5] R. J. Mantz, *Control por Modos Deslizantes Tomo 1. Modos deslizantes de primer orden: Fundamentos y aplicaciones*, 2020.

[6] L. Wu et al., “Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022.

ÁULICA**HIDRÁULICA**HIDRÁ

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS I-D-R PARA LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES A PARTIR DE MÉTODOS DE REGIONALIZACIÓN

Villaflor, Tomás; Angheben, Enrique

UIDET Hidrología - Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNLP
Calle 47 N° 200, piso 1, La Plata - Tel. 0221-427-5223
tomas.villaflor@alu.ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El diseño hidrológico busca interpretar y cuantificar los fenómenos naturales involucrados en el ciclo hidrológico a través de la recolección de datos, su análisis y posterior procesamiento, por medios matemáticos o estadísticos con la finalidad de aportar parámetros cuantitativos para el desarrollo de obras de ingeniería hidráulica de infraestructura y de medio ambiente. El principal objetivo del diseño hidrológico suele ser estimar la *tormenta de diseño*, para lo cual es necesario establecer relaciones entre los parámetros característicos que definen a una tormenta, esto es, intensidad, duración y recurrencia.

Tormenta de diseño es aquel evento hipotético pluvial más intenso, estadísticamente previsible, para una duración dada y recurrencia asignada, que al ser utilizada como dato de entrada en un modelo precipitación-escorrentía permite conocer la crecida de proyecto. Muchas veces su obtención se ve afectada por la insuficiencia de los registros pluviográficos necesarios para la determinación de las relaciones I-D-R, por lo que cada proyectista se ve obligado a utilizar metodologías para su estimación según su criterio propio. En consecuencia, se torna necesario establecer metodologías que permitan homogeneizar las técnicas de estimación de las variables para la predicción de las precipitaciones máximas utilizadas en el cálculo hidrológico de obras hidráulicas.

El presente trabajo busca disminuir la incertidumbre en dicha predicción de las tormentas de diseño a partir de la construcción de relaciones I-D-R para los 135 partidos que conforman la provincia de Buenos Aires, aplicando metodologías que permiten homogeneizar las técnicas de estimación y generar un agrupamiento de los parámetros de manera de unificar el cálculo hidrológico.

En esta primera etapa del trabajo, se analiza el Método Regional de tres parámetros, desarrollado por el Ing. Gustavo A. Devoto en el año 2002. Motiva esta elección el hecho de que esta metodología se encuentra incorporada en el “Manual para el diseño de Planes Maestros para la mejora de la infraestructura y la gestión del drenaje urbano” de la propia provincia de Buenos Aires.

METODOLOGÍA

El Método Regional de tres parámetros propuesto por el Ingeniero Devoto en el año 2002 y actualizado en agosto del año 2020 en la Conferencia [Ref. 1] organizada por el Instituto Argentino de Recursos Hídricos (IARH), se basa en la expresión de curvas I-D-R propuesta por Talbot (1904), que establece que:

$$i = \frac{a}{(t+c)^b}$$

Donde “i” es la intensidad de precipitación en mm/hora para una duración de “t” minutos y “T” años de recurrencia. A su vez:

$$i\,[^{mm}/_{h}] = \frac{X}{t[min]} \times 60$$

$$X = \bar{X} \times \left\{1 - \frac{0.5572}{1.282} \times C_V - \frac{1}{1.282} \times C_V \times \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]\right\}$$

Donde:

X: Precipitación, variable aleatoria caracterizada por una función de Gumbel y expresada en función de $\bar{X}$, C_v, y T.
$\bar{X}$: Precipitación media de duración “t” en mm. Este dato se obtiene de los mapas de isohietas adjuntas al trabajo del Ing. Devoto.
C_v: Coeficiente de variación para una precipitación media de duración “t”. Este dato es obtenido de los mapas de isolíneas adjuntas al trabajo del Ing. Devoto.

De la expresión de Talbot se desprende que será necesario plantear un sistema de tres ecuaciones para determinar los tres parámetros, donde “a”, “b” y “c” son coeficientes que responden a las siguientes expresiones:

$$\frac{\log\left({}^{i_1}/_{i_2}\right)}{\log\left(\frac{t_2 + c}{t_1 + c}\right)} = \frac{\log\left({}^{i_2}/_{i_3}\right)}{\log\left(\frac{t_3 + c}{t_2 + c}\right)}$$

“c” es aquel valor que iguale ambos miembros, obtenido a través de un proceso iterativo. Determinado el valor del coeficiente “c”, entonces,

$$b = \frac{\log\left({}^{i_2}/_{i_1}\right)}{\log\left(\frac{t_1 + c}{t_2 + c}\right)}$$

$$a = i_1 \times (t_1 + c)^b$$

Así mismo, como se observa en las expresiones anteriores, para la aplicación del método se requiere disponer de datos de entrada tales como la precipitación media y el coeficiente de variación obtenidos para tres duraciones de tormentas diferentes de 60, 180 y 360 minutos respectivamente. A continuación, se describe la metodología utilizada para la estimación de dichos parámetros para los 135 particos que conforman la provincia de Buenos Aires.

Haciendo uso de las capas de información que ofrece el Instituto Geográfico Nacional (IGN) se generó, en un Sistema de Información Geográfica (SIG), un proyecto en el que se incluyen los límites entre los partidos y el centro geométrico de cada uno de ellos, tal como se muestra en la siguiente Figura 1. En esa ubicación es donde serán estimados, mediante el método de regionalización propuesto, los datos de entrada a ser utilizados en la posterior construcción de las curvas I-D-R, y para recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. El rango de períodos de retorno analizado se corresponde con los normalmente requeridos por la autoridad de control para el diseño de obras hidráulicas.

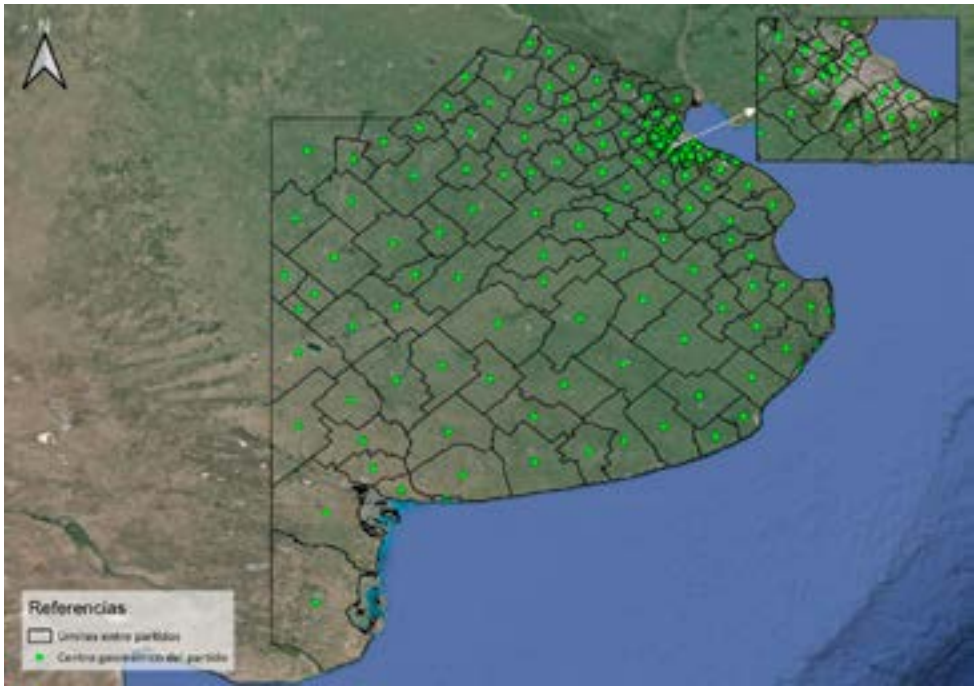


Figura 1.- Partidos de la provincia de Buenos Aires y sus centros geométricos

Entonces, fueron estimados en sus centros geométricos, y para cada partido, los datos de entrada a través técnicas de interpolación.

Para este fin, los mapas de isolíneas de coeficientes de variación e isolíneas de precipitación anexas al trabajo del Ing. Devoto fueron georreferenciados y procesados, empleando herramientas de digitalización para interpolar entre las curvas originales buscando disminuir el error de estimación en cada uno de los 135 puntos. A modo de ejemplo se presenta en la siguiente Figura 2 la interpolación resultante, correspondiente a las isolíneas de precipitación de duración 3 horas.

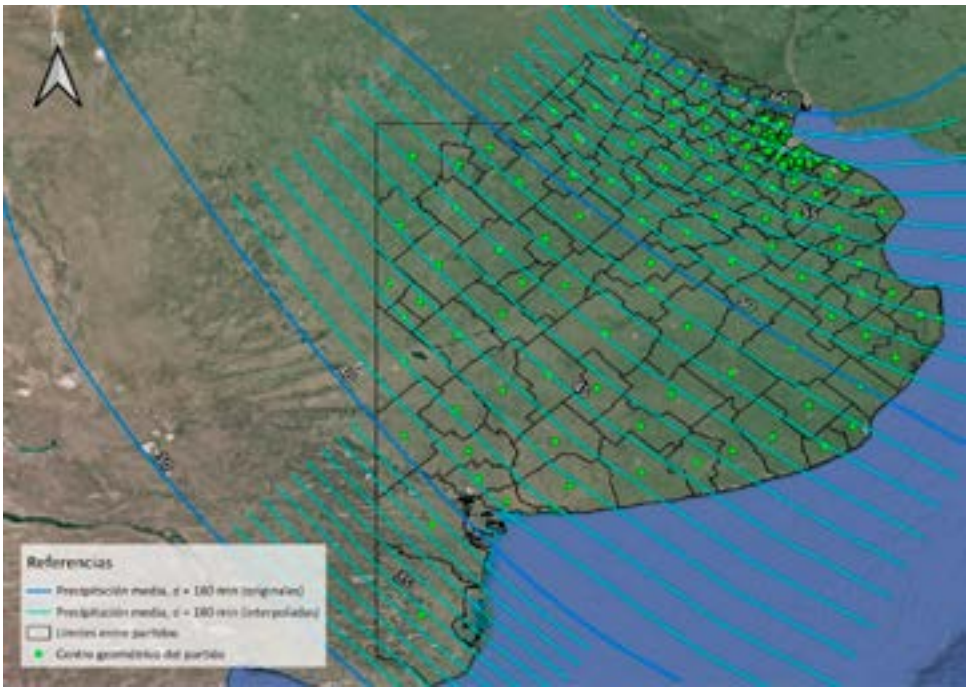


Figura 2.- Resultado proceso de interpolación para una precipitación media de 3 horas de duración

DISCUSIÓN - RESULTADOS

Habiéndose digitalizado todos los gráficos de isolíneas de precipitación y de coeficiente de variación, se obtuvieron los datos, para el centro geométrico de cada partido, necesarios para la aplicación del método, y para tres duraciones diferentes. Cabe destacar que, según establece el Ing. Devoto en su conferencia, el coeficiente de variación no se ve considerablemente afectado por la duración, por lo que es posible unificar dicho coeficiente para duraciones características de 1, 3 y 6 horas, es por ello entonces que se ha decidido trabajar con dichas duraciones para el desarrollo del trabajo.

Entonces, a través de una interpolación lineal fueron estimados los valores de precipitación media y coeficiente de variación para los 135 municipios que componen la provincia de Buenos Aires, obteniéndose un paquete de cuatro datos de entrada para cada uno de ellos.

Luego, a partir de la metodología desarrollada en el punto anterior, se trabajó en un entorno Excel para generar un conjunto de coeficientes “a”, “b” y “c” para cada una de las recurrencias propuestas, obteniéndose una matriz de 6x3 datos para cada partido de la provincia.

A modo de ejemplo, en la siguiente Tabla 1 se muestran los coeficientes obtenidos para 3 partidos de la provincia en particular.

Tabla 1.- Coeficientes de ajuste ecuación de Talbot en tres partidos de la provincia de Buenos Aires

R [años]	Junín			Monte Hermoso			La Costa		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
2	457,22	0,64	-7,93	535,93	0,71	13,85	4.389,71	1,01	69,68
5	584,72	0,64	-7,93	749,60	0,71	13,85	5.743,31	1,01	69,68
10	669,14	0,64	-7,93	891,07	0,71	13,85	6.639,52	1,01	69,68
25	775,80	0,64	-7,93	1.069,82	0,71	13,85	7.771,87	1,01	69,68
50	854,93	0,64	-7,93	1.202,42	0,71	13,85	8.611,92	1,01	69,68
100	933,48	0,64	-7,93	1.334,05	0,71	13,85	9.445,76	1,01	69,68

Con este conjunto total de datos obtenidos es posible comenzar a trabajar en el procesamiento estadístico que permita analizar su variabilidad espacial y temporal de manera evaluar un posible agrupamiento que minimice el error del cálculo hidrológico.

CONCLUSIONES

Con lo generado hasta aquí es posible construir las curvas Intensidad – Duración – Recurrencia para cada uno de los partidos de la provincia, en su centro geométrico y para todo el rango de recurrencias propuestas.

Sin embargo, el objetivo del presente trabajo es el de generar un agrupamiento de los coeficientes que definen a dichas curvas, con un criterio estadístico consistente, de manera de poder unificar el cálculo por zonas o sectores de similar relación I-D-R, y de esa manera reducir la incertidumbre por parte de los proyectistas en la determinación de las tormentas de diseño en la provincia de Buenos Aires.

El resultado de dicho agrupamiento se espera pueda ser presentado en las próximas Jornadas ITEE 2027, como continuación y corolario de los avances obtenidos en esta instancia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Conferencia virtual Devoto G. (2020). Instituto Argentino de Recursos Hídricos (IARH). https://www.youtube.com/watch?v=5fBU2f0PUYc

[2] Devoto, G. (2002); Regionalización de lluvias intensas en Argentina. *XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina*.

[3] Ministerio de Infraestructura de la Provincia de Buenos Aires (2011); "Manual para el Diseño de Planes Maestros para la Mejora de la Infraestructura y la Gestión del Drenaje Urbano"; *Buenos Aires*.

ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD AMBIENTAL PARA ALTERNATIVAS DE PROYECTO APROVECHAMIENTO MULTIPROPÓSITO CHIHUIDO I, PROVINCIA DE NEUQUÉN

Mónica Salvioli, Marcos Cipponeri, Carlos Angelaccio, Julia Branne, Gabriela Calvo

UIDET Gestión Ambiental, Departamento de Hidráulica. Calle 47 Nº 200.
mcipponeri@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el proceso de análisis y comparación ambiental de alternativas de proyecto del Aprovechamiento Multipropósito Chihuido I, respecto de diferentes cotas de coronamiento de la presa en las localizaciones definidas para su materialización, en el tramo medio de la cuenca del río Neuquén, provincia de Neuquén.
El objetivo principal de este proyecto es incrementar el control de crecidas aguas abajo, mientras que los objetivos complementarios apuntan a mejorar la disponibilidad de agua y a realizar un aporte de energía hidroeléctrica al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Los dos primeros objetivos generarán beneficios para la población y las actividades productivas localizadas en el área de influencia del proyecto, fundamentalmente aquella localizada aguas abajo del embalse; mientras que en el último caso la población beneficiada es la provista por el SIN.
Se analizaron como representativos, los siguientes valores alternativos de cota de coronamiento de presa: 615, 625, 635 y 650 msnm.

DESARROLLO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología, descripta en el capítulo 5 de Cipponeri *et al.* (2023), incluyó las siguientes actividades:

- Definición de datos morfométricos del embalse y sus variaciones entre las cotas y aproximación de energía media anual (EMA) a generar para cada alternativa (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Tabla 2 Tabla 3 y Figura 1).

Tabla 1. Datos morfométricos de embalse. Alternativas de cotas de coronamiento

Cota de Embalse (m IGN)	Superficie de Embalse (Ha)	Perímetro de Embalse (Km)	Volumen de Embalse(*) (Hm³)
625	13878,8	327,36	3851,0
635	17839,2	387,78	5411,5
615	22949,7	423,90	7368,3
650	30042,0	511,86	11750,3

(*) dato de AyEE año 1977

Tabla 2. Variación de datos morfométricos de embalse. Alternativas de cotas de coronamiento

Δ Cota de Embalse (m IGN)	Δ Superficie de Embalse (Ha)	Δ Perímetro de Embalse (Km)	Δ Volumen de Embalse(*) (Hm³)
615 / 625	3960,4	60,417	1560,5
625 / 635	5130,5	36,118	1956,8
635 / 650	7192,3	87,963	4382,0
615 / 650	16283,2	184,5	7899,3

Δ Cota (m IGN)	Δ Superficie %	Δ Perímetro %	Δ Volumen %
615 / 625	24,32%	32,75%	19,75%
625 / 635	31,51%	19,58%	24,77%
635 / 650	44,17%	47,68%	55,47%
615 / 650	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 3. Producción de energía media anual. Alternativas de cotas de coronamiento

NIVEL CONSTANTE	
COTA (m IGN)	EMA (GWh)
615	1723,7
625	1891,0
635	2042,7
640	2113,5
650	2239,0

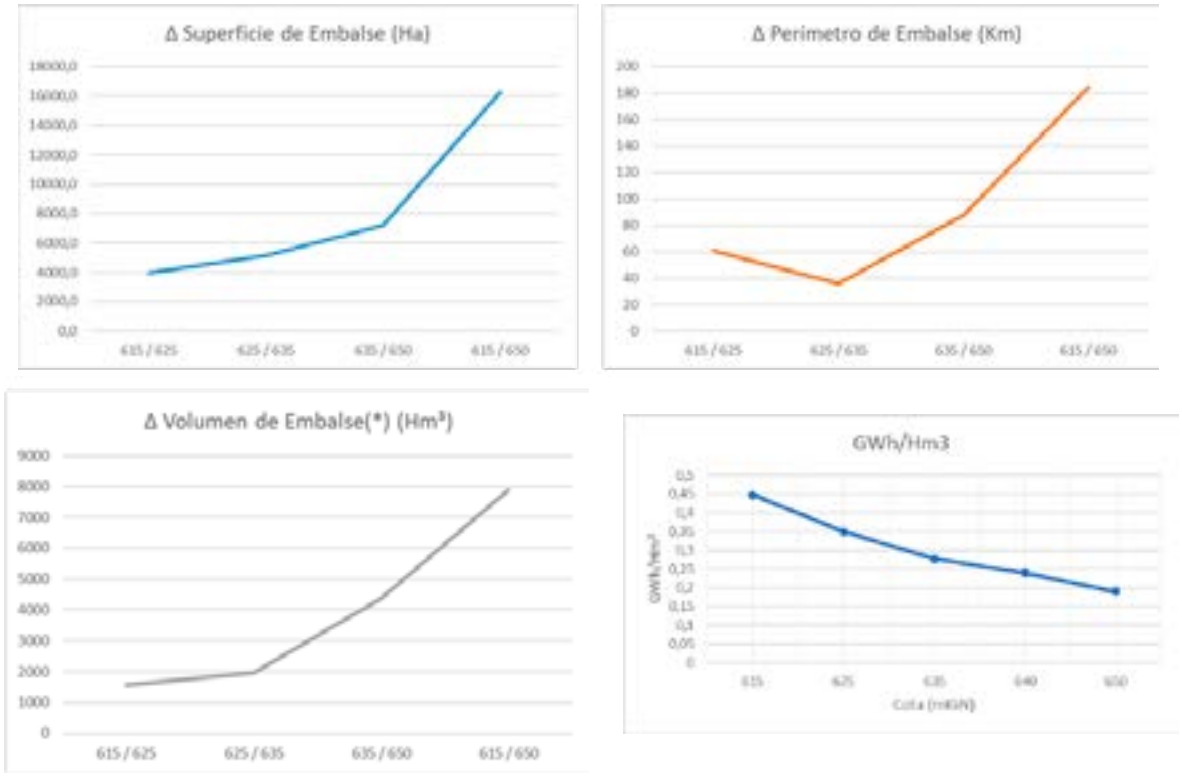


Figura 1. Gráficos. Variación de superficie, perímetro volumen de embalse y de EMA por Hm^3 entre cotas alternativas

- Identificación y caracterización de factores socio-ambientales sensibles. Los del medio socioeconómico fundamentalmente asociados con las localidades y parajes ubicados en la zona de influencia; los del medio natural, ya sea biótico como abiótico, que puedan verse afectados por el proyecto.

- Identificación y breve caracterización de criterios ambientales de comparación. Estos criterios se seleccionaron en función de parámetros morfométricos del embalse para cada alternativa, consignas de operación del mismo y, para aquellos criterios que involucran condiciones antrópicas, población y superficies afectadas. En el análisis se consideraron recomendaciones y lineamientos establecidos por la Comisión Mundial de Presas y el Banco Mundial (2000), respecto del tema desarrollado. Se identificaron 9 criterios ambientales según se desarrolla en la Tabla 4.

- Definición de indicadores y escalas de valoración de criterios. Para cada criterio se estableció un indicador que refleja una escala de afinidad o compatibilidad ambiental (1 representa la peor condición y 3 la mejor) que permitió valorar cada alternativa de proyecto con respecto a cada criterio, estableciendo algo que podría denominarse una compatibilidad parcial de la alternativa con el criterio.

- Comparación de alternativas. Una vez definidos los indicadores, se los aplicó sistemáticamente a cada alternativa. El procedimiento consistió en cotejar cada alternativa con cada uno de los criterios y completar la Matriz Base de Compatibilidad Ambiental colocando las calificaciones que correspondan en cada caso. En cada cruce de fila y columna se incorporó una calificación de 1 a 3, según el caso (ver Tabla 5).
Posteriormente se estableció la importancia de cada criterio mediante la asignación de niveles jerárquicos de importancia y posterior comparación de a pares, en la Tabla 6 se muestran ambos pasos, entre paréntesis figura el orden de jerarquía establecido para cada criterio y en la tabla se desarrolla la comparación de a pares obteniendo el peso de cada criterio. Una vez

ponderados los criterios, se completó la Matriz de Compatibilidad Ambiental (ver Tabla 7) colocando las calificaciones ponderadas a cada alternativa, consistentes en la multiplicación del valor 1 a 3 por el factor de ponderación (Pi). El rango de compatibilidad ambiental global final de cada alternativa varió entre 1 y 3, siendo 3 el valor de mejor compatibilidad ambiental, y 1 el peor.

Tabla 4. Criterios, indicadores y escalas de compatibilidad ambiental de alternativas de proyecto

CRITERIO	INDICADOR	ESCALAS DE COMPATIBILIDAD AMBIENTAL		
1. INUNDACIÓN POR DESARROLLO DEL EMBALSE	Superficie a inundar	BAJA	1	20.000 – 31.000 has
		MEDIA	2	Entre 14.000 -20.000 has
		ALTA	3	< o igual a 14.000 has
2. FRAGMENTACIÓN DEL ECOSISTEMA ACUÁTICO	Longitud de cauces afectado por cambio de régimen	BAJA	1	>60 Km
		MEDIA	2	Entre 50 – 60 Km
		ALTA	3	< 50 Km
3. DEMANDA DE RECURSOS MINERALES	Volumen de presa (volumen normalizado a cota 650)	BAJA	1	> 0,8
		MEDIA	2	0,62 < Vn < 0,82
		ALTA	3	Vn < 0,62
4. AFECTACIÓN DEL RÉGIMEN HÍDRICO Y DE LA MORFOLOGÍA DEL CAUCE POR CAMBIO DE REGIMEN DE SEDIMENTOS, AGUAS ABAJO DE LA PRESA	Volumen de embalse, regulación de caudales, producción de sedimentos aguas abajo del embalse	BAJA	1	Mayor capacidad de regulación de caudales asociada a mayor volumen y superficie de embalse
		MEDIA	2	Moderada capacidad de regulación
		ALTA	3	Baja capacidad de regulación
5. AFECTACIÓN VEGETACIÓN RIPARIA AGUAS ABAJO PRESA	Régimen de caudales y fluctuación de niveles aguas abajo	BAJA	1	Mayor capacidad de regulación de caudales asociada a mayor volumen y superficie de embalse
		MEDIA	2	Moderada capacidad de regulación
		ALTA	3	Baja capacidad de regulación
6. AFECTACIÓN DE ICTIOFAUNA	Superficie y longitud de embalse	BAJA	1	Intensidad de disrupción elevada
		MEDIA	2	Intensidad de disrupción moderada.
		ALTA	3	Intensidad de disrupción baja.
7. PÉRDIDA DE AGUA POR EVAPORACIÓN	Superficie de embalse	BAJA	1	20.000 – 31.000 has
		MEDIA	2	Entre 14.000 -20.000 ha.
		ALTA	3	< o igual a 14.000 has.
8. AFECTACIÓN DE POBLACIONES LOCALES	Superficie a afectar	BAJA	1	Superficie que involucra a Quili Malal, Agrio del Medio, Bajada del Puente/Villa del Agrio y Bajada del Agrio en la subcuenca del río Agrio
		MEDIA	2	Superficie que afecta Quili Malal, Agrio del Medio hasta inmediaciones de planta urbana de Bajada del Agrio
		ALTA	3	Superficie que no afecta las localidades mencionadas
9. AFECTACIÓN PATRIMONIO CULTURAL MATERIAL E INMATERIAL	Superficie a afectar	BAJA	1	Superficie que involucra el patrimonio cultural de Quili Malal, Agrio del Medio, Bajada del Puente/Villa del Agrio y Bajada del Agrio en la subcuenca del río Agrio
		MEDIA	2	Superficie que afecta el patrimonio cultural localizado en Quili Malal, Agrio del Medio hasta inmediaciones de de Bajada del Agrio
		ALTA	3	Superficie que no afecta el patrimonio cultural de la subcuenca del río Agrio
10. GENERACIÓN DE ENERGÍA	Relación potencia/volumen de embalse (Gwh/Hm^3)	BAJA	1	< o igual a 0,25
		MEDIA	2	Entre 0,3 y 0,25
		ALTA	3	Entre 0,45 y 0,3

Tabla 5. Matriz Base de Compatibilidad Ambiental de Alternativas

Criterio de comparación	Alternativas de proyecto			
	A1 (615)	A2 (625)	A3 (635)	A4 (650)
1. Inundación por desarrollo del embalse	3	2	1	1
2. Fragmentación del ecosistema acuático	3	2	1	1
3. Demanda de recursos minerales	3	2	2	1
4. Afectación del régimen hídrico y de la morfología del cauce aguas abajo presa	3	2	1	1
5. Afectación de vegetación riparia aguas abajo presa	3	2	1	1
6. Afectación de ictiofauna	1	1	1	1
7. Pérdida de agua por evaporación	3	2	2	1
8. Afectación de poblaciones locales	2	2	1	1
9. Afectación de patrimonio cultural	2	1	1	1
10. Generación de energía	3	3	2	1

Tabla 6. Jerarquización por niveles de los criterios y Matriz de comparación de coeficientes de a pares

Criterios de comparación	Inundación por desarrollo del embalse	Fragmentación del ecosistema acuático	Demanda de recursos minerales	Afectación régimen hídrico y morfología cauce aguas abajo presa	Afectación vegetación riparia aguas abajo presa	Afectación de ictiofauna	Cambios microclimáticos	Afectación de poblaciones locales	Afectación de patrimonio cultural	Generación de energía	A = ∑ Aij (valores filas)	Pi = A/B
Inundación por desarrollo del embalse (1)		1/2	1	1/2	1	1	1	1/2	1	1	7,5	0,17
Fragmentación del ecosistema acuático (1)	1/2		1	1/2	1	1	1	1/2	1	1	7,5	0,17
Demanda de recursos minerales (3)	0	0		0	0	0	1/2	0	0	1/2	1	0,02
Afectación régimen hídrico y morfología del cauce aguas abajo presa (1)	1/2	1/2	1		1	1	1	1/2	1	1	7,5	0,17
Afectación vegetación riparia aguas abajo presa (2)	0	0	1	0		1/2	1	0	1/2	1	4	0,09
Afectación de ictiofauna (2)	0	0	1	0	1/2		1	0	1/2	1	4	0,09
Cambios microclimáticos (3)	0	0	1	0	0	0		0	0	1/2	1	0,02
Afectación de poblaciones locales (1)	1/2	1/2	1	1/2	1	1	1		1	1	7,5	0,17
Afectación de patrimonio cultural (3)	0	0	1	0	1/2	1/2	1	0		1	4	0,09
Generación de energía (3)	0	0	1/2	0	0	0	1/2	0	0		1	0,02
									B = ∑∑ Aij (valores columna)		45	1

Tabla 7. Matriz de Compatibilidad Ambiental

Criterio de comparación	Pi	Alternativas de proyecto			
		A1 615	A2 625	A3 635	A4 650
1. Inundación por desarrollo del embalse	0,17	0,5	0,34	0,17	0,17
2. Fragmentación del ecosistema acuático	0,17	0,5	0,34	0,17	0,17
3. Demanda de recursos minerales	0.02	0,06	0,04	0,04	0,02
4. Afectación del régimen hídrico y de la morfología del cauce aguas abajo presa	0,17	0,5	0,34	0,17	0,17
5. Afectación de vegetación riparia aguas abajo presa	0.09	0,27	0,18	0,09	0,09
6. Afectación de ictiofauna	0.09	0,09	0,09	0,09	0,09
7. Pérdida de agua por evaporación	0.02	0,06	0.04	0,04	0,02
8. Afectación de poblaciones locales	0,17	0,34	0,34	0,17	0,17
9. Afectación de patrimonio cultural	0.09	0,18	0,09	0,09	0,09
10. Generación de energía	0.02	0,06	0,06	0,04	0,02
	1	2,56	1,86	1,07	1

El desarrollo de la metodología aplicada para establecer la compatibilidad ambiental global de diferentes alternativas de proyecto, asociadas a distintos niveles de embalse o coronamiento, permite identificar un conjunto de criterios e indicadores que ponen de manifiesto la significación y la sensibilidad que esta dimensión tiene para las diferentes opciones consideradas.
Un importante número de los criterios e indicadores seleccionados se vinculan de manera directa con las características morfométricas del embalse, las que dependen básicamente de su nivel (o altura de coronamiento de la presa), constituyéndose este parámetro en el principal de los utilizados.
Es de destacar que, si bien el criterio “afectación a la ictiofauna” presenta el mismo valor para todas las alternativas, se consideró oportuno incluirlo en las matrices, para poner en evidencia que cualquiera sea la altura de presa seleccionada representará un obstáculo significativo para las conductas migratorias y los efectos encadenados que esto pueda generar en el ecosistema aguas arriba y aguas abajo de la misma.
La aplicación de la metodología permitió obtener los siguientes resultados (ver Tabla 7) de grado de compatibilidad global de cada una de las alternativas:
Cota 615: 2,56; Cota 625: 1,86; Cota 635: 1,07; Cota 650: 1.

CONCLUSIONES

Se pudo concluir que las alternativas con cotas de coronamiento por sobre 625 msnm serían inaceptables por su bajo grado de compatibilidad ambiental y las que se encuentran en esta última cota o por debajo de ella serían aceptables desde el mismo punto de vista.
En síntesis, las alturas de coronamiento de la presa aceptables desde un punto de vista ambiental son las que están en el rango de 615 a 625 msnm. Dicho rango debería estudiarse desde otros puntos de vista (técnico, económico, legal/institucional, etc.) para finalmente seleccionar la cota de proyecto definitiva.
Asimismo, a través de este análisis han surgido un conjunto de componentes ambientales particularmente sensibles a algunas de las acciones disruptivas que un proyecto de esta magnitud genera, sirviendo estos resultados para orientar el alcance y la profundidad del Estudio de Impacto Ambiental a efectuar sobre la alternativa de proyecto finalmente seleccionada.

BIBLIOGRAFÍA

Agua y Energía Eléctrica Empresa del Estado. 1977. Departamento de Estudios y Proyectos. "Aprovechamiento hidroeléctrico El Chihuido. Proyecto Ejecutivo" Pliego AyEE DEP N°1058.

Banco Mundial. 2000. "Marco Ambiental y Social". Earthscan Publications Ltd. - Copyright ©

Cipponeri, M. et al 2023. "Evaluación y estudio de impacto ambiental". Libro de Cátedra. Edulp. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/169517

Carcavallo, R.U. & J. Jenkins Molieri. 2000. "Las Represas y sus efectos sobre la salud". En: Comisión Mundial de Represas. Capítulo 12: "Análisis de la ecología relacionada a los proyectos hídricos".

Comisión Mundial de Represas. 2000. "Represas y desarrollo. Un nuevo marco para la toma de decisiones". Reporte Final.

Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A.M., Tabacchi, E. y L. Roques. 2009. "Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors". Earth Surface Process & Landforms 34: 1790-1810.

Di Martino, S. & M. Monteverde. "Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Ejecutivo del Aprovechamiento Multipropósito Chihuido I. Componente Biótico. Fauna Terrestre". Informe Final. Secretaría de Estado de Recursos Naturales Provincia del Neuquén.

EBISA. 2008. "Aprovechamiento multipropósito "Los Chihuidos". Estudio para la definición de niveles de embalse y elaboración de los términos de referencia del proyecto básico. Estudio Ambiental Expeditivo". Secretaría de Energía de la Nación. Gobierno de la Provincia del Neuquén. AIC – EBISA.

Gómez Balandra, M.A., Saldaña Fabella, P., Lecanda Terán, C. y E. Gutiérrez Lopez. 2006. "Aspectos relevantes para la evaluación del impacto ambiental regional por obras hidráulicas". XV Congreso Nacional de Ingeniería sanitaria y Ciencias Ambientales, México.

Movía, C., Pérez, G. y C. Ower. 1982. "Estudio de la vegetación natural de la provincia del Neuquén". Ministerio de Economía y Hacienda. Subsecretaría de Recursos Naturales.

REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE PREDIMENSIONADO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Carvalho Rodrigues, Germán Elías; Lucino, Cecilia; Angulo, Mauricio

UIDET Hidromecánica - Facultad de Ingeniería - UNLP

Calle 47 N° 200, La Plata (CP1900), Argentina – elias.carvalho@alu.ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

En el momento de tener que definir el tipo y dimensiones generales de las turbinas para una central hidroeléctrica es usual recurrir a los métodos propuestos por los autores De Siervo y De Leva (DS y DL) [1], para el caso de las turbinas Francis y Kaplan. Estos investigadores analizaron estadísticamente una cantidad importante de datos de máquinas construidas en distintas épocas, sistematizados a partir de la teoría de la similitud, para hallar expresiones analíticas que permiten obtener las dimensiones principales, velocidades de giro y cotas de instalación de las máquinas. Estas variables de diseño están directamente vinculadas al factor costo y a la prevención de la cavitación. Una buena estimación de estas dimensiones es muy importante en la etapa de anteproyecto, especialmente, en el caso de obras con turbinas de alta potencia (del orden de centenares de megavatios por unidad), aunque luego, en el proceso licitatorio, los fabricantes seguramente ofrecerán diseños algo diferentes al preliminar, basados en su experiencia y experticia en el tema.

Las ecuaciones de predimensionado presentadas por DS y DL, normalmente utilizadas hasta la actualidad, surgen de datos de centrales hidroeléctricas construidas en las décadas de 1960 y 1970, es decir, hace más de 50 años. Dados los importantes avances tecnológicos de las últimas décadas, relacionados a la optimización del diseño y construcción de las turbinas, cabe preguntarse si estos impactan de manera significativa o no en las dimensiones generales, definición de la velocidad de giro y cota de instalación, con relación a las tendencias que mostraban las turbinas más de 50 años atrás. En este trabajo se presenta un análisis comparativo de estas características, tomando una base de datos actualizada de turbinas Francis, construidas a partir de 1990, para luego comparar los resultados con los anteriores. A su vez, existiendo actualmente turbinas Francis que generan más de 700 MW (en centrales hidroeléctricas chinas), se analizaron en forma particular los datos de diseño de estas, en forma comparativa con las tendencias generales definidas a partir de datos de potencias menores.

MARCO TEÓRICO

Una turbina hidráulica tiene distintas variables de diseño, tales como caudal, salto, diámetro, velocidad de giro, rendimiento, potencia y sumergencia. Todas estas variables están relacionadas entre sí y cada fabricante posee su propio criterio de optimización.

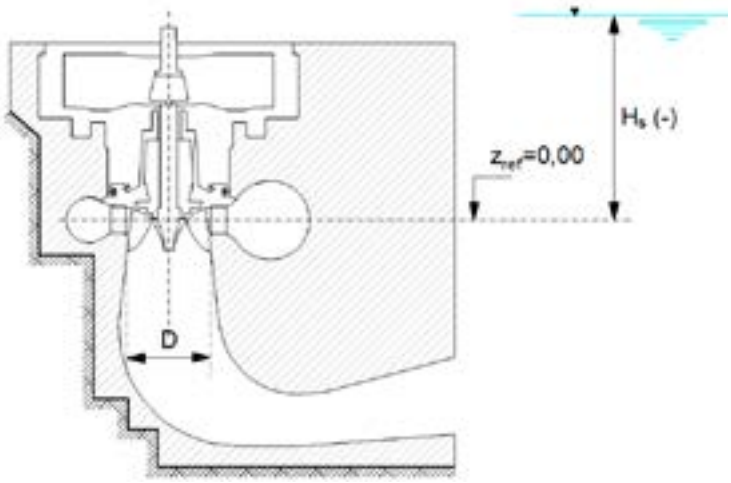


Figura 1. Esquema de turbina Francis en donde se indica el diámetro D y la sumergencia H_s.

La teoría de la similitud permite establecer las relaciones entre los parámetros de diseño y asociarlos a cada turbina instalada. Uno de los parámetros principales es el número específico según potencia n_s, que se define como se indica en la ecuación [1]. La similitud es la herramienta que permite comparar distintos diseños, es decir, proporciones geométricas, independientemente de sus magnitudes.

$$n_s = \frac{n * P^{1/2}}{H_u^{5/4}} \qquad [1]$$

Donde:
n_s: número específico según potencia
n: velocidad de giro, en rpm
P: potencia mecánica, en kW
H_u: salto útil, en m

El número específico es una combinación de parámetros de operación que se mantiene constante en máquinas con condiciones geométricamente semejantes, independientemente de su tamaño. La evolución del diseño de máquinas por casi 150 años ha conducido a que para cada salto de diseño H_u, se halle un orden de número específico n_s más conveniente, es decir, que hace dar con máquinas de mejor relación beneficio-costo, que es la de menor tamaño que presenta un óptimo rendimiento y una adecuada instalación.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es la sumergencia recomendada para prevenir el desarrollo de la cavitación. El coeficiente que expresa la condición de desarrollo de la cavitación es el Sigma de Thoma, que viene dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H_u} \qquad [2]$$

Donde:
H_{atm}: altura de presión atmosférica, en m
H_v: altura de presión de vaporización del agua, en m
H_s: altura de aspiración o sumergencia, en m
H_u: salto útil de la turbina, en m

En este trabajo usaremos como base de comparación el método propuesto DS y DL para definir las dimensiones principales de las turbinas Francis y la sumergencia. Estos autores llevaron a cabo una recolección de datos de turbinas Francis de todo el mundo construidas entre 1960 y 1975. Luego, con estos datos calcularon para cada turbina su número específico según potencia n_s y los graficaron en función del salto útil H_u. Seguidamente realizaron procedimientos de regresión lineal simple y obtuvieron curvas por interpolación que relacionan ambas variables.

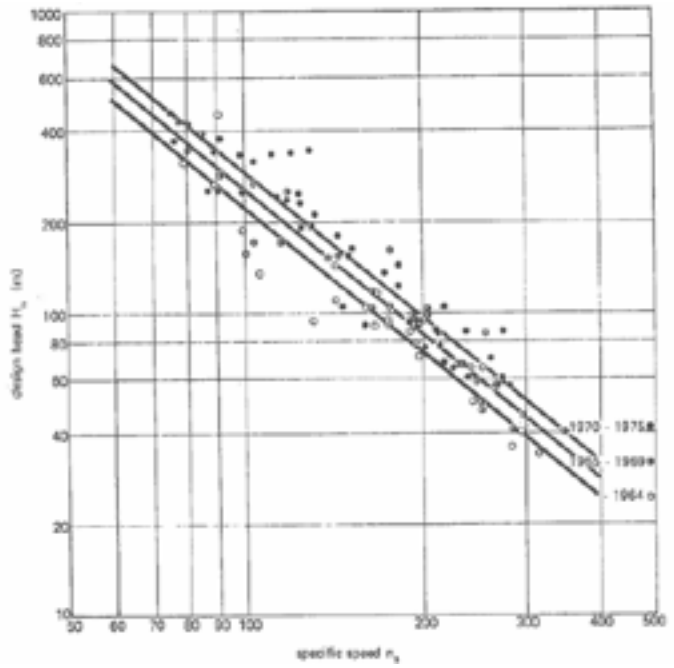


Figura 2. Relación entre el salto útil Hu y el número específico ns para turbinas Francis. Dispersión de datos y curvas de regresión para los tres períodos considerados. Fuente: Water Power & Dam Construction, 1976.

La ecuación propuesta para el último período analizado (1970-1975) es la siguiente:

$$n_s = 3470 * {H_u}^{-0,625} \qquad [3]$$

En la Figura 2 se muestra que, para el período considerado, ha existido una tendencia a incrementar el valor del número específico n_s para un salto dado. Para un determinado salto H_u y potencia P, un incremento en el número específico se corresponde con un aumento de la velocidad de giro de la turbina n (según la Ec. 1). La relación entre la velocidad de giro n y el diámetro del rodete de la turbina D se puede expresar a partir del cálculo del coeficiente de velocidad tangencial k_u, que se mantiene constante para un número específico determinado.

$$k_u = \frac{D*n*\pi}{60*\sqrt{2*g*H_u}} \qquad [4]$$

Por lo tanto, si para un salto dado se define un número específico más alto (y consecuentemente un n mayor), la Ec. 4 muestra que para mantener el coeficiente k_u constante debe disminuir el diámetro D. Todo lo expresado anteriormente indica que un desplazamiento de la tendencia hacia la derecha en la Figura 2 significa que, para un mismo salto útil, se han logrado desarrollar diseños de menores dimensiones, lo cual tiene un impacto económico favorable, por la reducción de costos que implica, principalmente en turbinas de gran tamaño. Por otro lado, los autores

desarrollaron un análisis análogo para obtener una ecuación de regresión que relaciona el Sigma de Thoma con el número específico:

$$\sigma = 7{,}54 * 10^{-5} * {n_s}^{1{,}41} \qquad [5]$$

De esta manera, utilizando la Ec. 5 y la Ec. 2 es posible relacionar un diseño de turbina (implícito en el número específico n_s) con la sumergencia mínima asociada H_s para prevenir el desarrollo de la cavitación.

MATERIALES Y MÉTODO

Siguiendo el sentido de lo mencionado en el apartado precedente, el presente trabajo realiza un análisis basado en la teoría de la similitud similar al de DS y DL con el fin de verificar si, con el paso de los años, la tendencia (y en consecuencia, las ecuaciones) se mantiene y, en caso contrario, proponer ecuaciones actualizadas en base a una nueva regresión lineal simple.

Para el estudio de la relación H_u - n_s se recolectaron los datos de 21 centrales [2] filtradas y clasificadas según los siguientes dos criterios:

1) La potencia unitaria de la central debe estar comprendida entre 50 y 500 MW.
2) La construcción de las centrales debe ser posterior al año 1990.

El primer criterio surge de la necesidad de estar en un rango de potencias donde sin dudas es válida la aplicabilidad de las ecuaciones de DS y DL y el segundo criterio se sustenta en el objetivo de evaluar la influencia de las nuevas tecnologías de modelado y dimensionamiento y si éstas presentan un eventual apartamiento de las ecuaciones de dichos autores. Por otro lado, se obtuvieron datos de centrales con turbinas Francis de potencias superiores a 700 MW, (mucho mayores que las de referencia para los métodos tradicionales) por lo cual se consideró de interés realizar un análisis separado de las que cumplen el criterio 1, con el fin de analizar si las ecuaciones de los autores son también aplicables en ese rango de potencias.

Luego, para el estudio de la relación σ - n_s solo se recolectaron datos de 6 centrales Francis, dada la dificultad que representa la obtención de información del Sigma de Thoma de una central ya construida y en operación y la cota de instalación de la máquina y su sumergencia mínima (asociada al nivel mínimo de la restitución). De igual manera, se procedió con el procesamiento de estos datos y su posterior análisis y comparación.

RESULTADOS

En la Figura 3 se observa la comparación entre datos de centrales relativamente actuales (puntos rojos) con la ecuación presentada por DS y DL (línea azul). Es posible notar que hay una gran dispersión entre los datos, aunque sin una clara evidencia de un apartamiento de la tendencia hallada por los autores décadas atrás. A partir de una regresión lineal simple de los datos volcados en el gráfico se llegó a la siguiente ecuación:

$$H_u = 3636 * {n_s}^{-0{,}630} \qquad [6]$$

Si se compara la representación de la ecuación de DS y DL (Ec. 3) con la ecuación propuesta (Ec. 6) se puede deducir que existe un ligero desplazamiento de la tendencia hacia la derecha, es decir, que para un mismo salto útil el diámetro resultaría menor. Sin embargo, a la luz de la dispersión observada en el gráfico de la Figura 3 y la casi coincidencia de las ecuaciones de regresión, se puede decir que, en general, los parámetros de predimensionado actuales para ese rango de potencias se han mantenido prácticamente invariables en las últimas décadas.

Sin embargo, distinta es la conclusión cuando se analizan centrales de gran potencia (mayores a 700 MW).

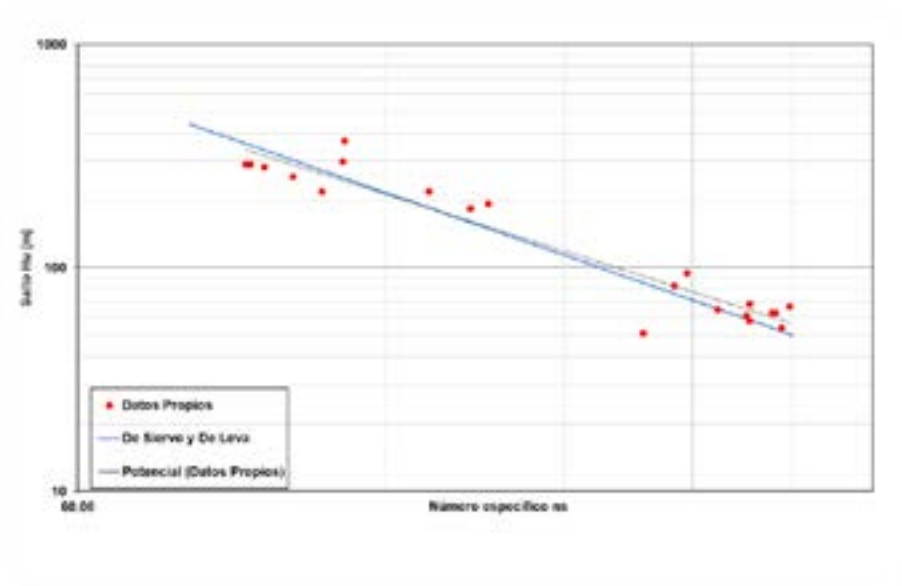


Figura 3: Comparación de centrales actuales Francis con la ecuación de De Siervo y De Leva.

En la Figura 4 se verifica un apartamiento mayor de la tendencia hallada por los autores y la propia, y su ecuación de regresión se determina como:

$$H_u = 3083 * {n_s}^{-0,577}$$

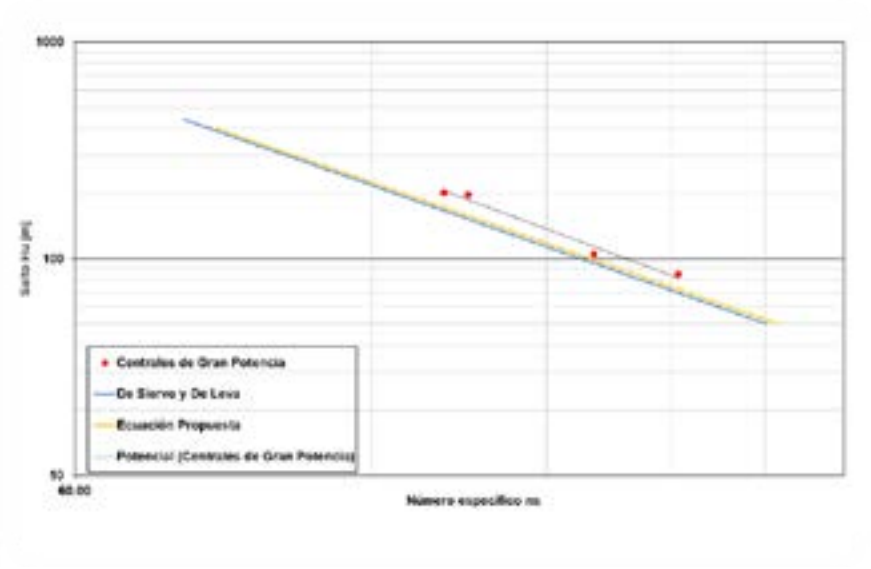


Figura 4: Turbinas Francis mayores a 700 MW con la ecuación de DS y DL y ecuación propuesta.

Sin embargo, para que estas conclusiones adquieran mayor sustento resultaría necesario incorporar más datos de turbinas de gran potencia. Si bien es de esperar que las nuevas tendencias indiquen que para un mismo salto útil se tenga un mayor número específico o, a lo sumo, uno similar, como se verificó anteriormente, no ocurrió algo análogo cuando se llevó a cabo el análisis de cavitación. En la Figura 5 se observa que, para un Sigma de Thoma constante, las

centrales actuales tienen un menor número específico que el propuesto por DS y DL y, por lo tanto, una sumergencia mayor a la recomendada por estos autores.

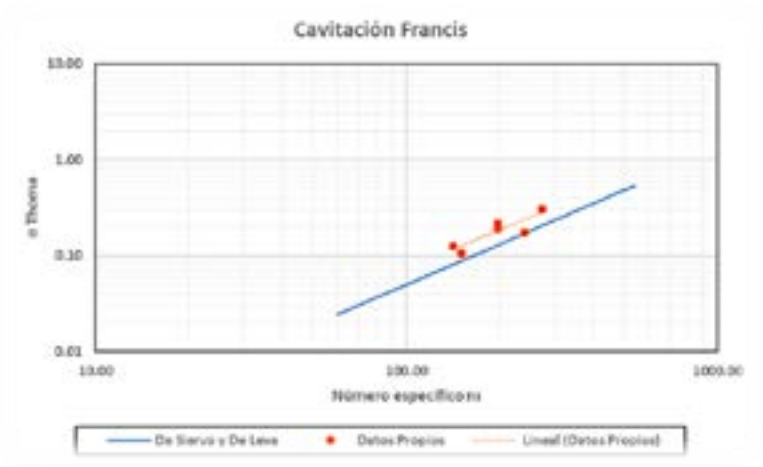


Figura 5: Comparación de centrales actuales con la ecuación de Sigma de Thoma presentada por DS y DL.

CONCLUSIONES

Del análisis de los datos procesados, en particular, los referidos a la sumergencia o cota de instalación de las turbinas, es posible inferir que las turbinas que componen la base de datos de De Siervo y De Leva han estado sometidas a condiciones de operación de mayor riesgo a la cavitación o, eventualmente, “con presencia de desarrollo de cavitación”, que las diseñadas en las últimas décadas. Este pudo haber sido un criterio técnico “aceptado”, mientras no tuviera impacto en el rendimiento.

Finalmente, como conclusión integral de este análisis, es posible deducir que la evolución de la tecnología de las turbinas hidráulicas de las últimas décadas no radica necesariamente en una reducción del diámetro para unas mismas condiciones de operación, sino en un aumento de la potencia unitaria, asociado a una garantía conservadora para evitar el desarrollo de la cavitación en condiciones normales de operación.

REFERENCIAS

[1] De Siervo y De Leva. Modern trends in designing Francis turbines. Revista Water Power & Dam Construction, 1976

[2] Water Power & Dam Construcción, 2022

RELACIÓN ENTRE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA Y DINÁMICA HÍDRICA DEL SISTEMA LAGUNA LA BOCA – ARROYO SAN MIGUEL – RÍO SALADO BASADO EN ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

Calvo, Gabriela; Branne, Julia; Cippponeri, Marcos; Salvioli, Mónica

UIDET Gestión Ambiental, Departamento de Hidráulica. Calle 47 Nº200.
gabriela.calvo@ing.unlp.edu.ar

Introducción

La laguna La Boca (Ex – San Lorenzo) está ubicada en el partido de Pila, Provincia de Buenos Aires (36° 4'56.54"S; 58° 1'10.41"O). Pertenece a un sistema de lagunas interconectadas entre sí, siendo ésta la última y la que conecta mediante el arroyo San Miguel al Río Salado (Figura 1). La misma está ubicada al final del sistema de los arroyos Azul, Gualicho, Zapallar y Camarones, antes de su descarga en el río Salado. Sus principales aportes provienen del sistema mencionado, con origen en las sierras de Tandil y, hasta hace unos 18 años, también contaba con aportes de caudales provenientes del río Salado, cuando los niveles relativos entre la misma y el río así lo permitían.



Figura 1: Vista de la laguna San Lorenzo con sus arroyos de aporte y descarga
Fuente: elaboración propia con base de Google Earth

En el año 2007 concluyeron las obras de dragado de este tramo del río Salado, lo que generó cambios en las condiciones naturales de escurrimiento de la cuenca, afectando al nivel de la laguna. Se estima que antes del dragado para caudales de 50 m³/s (P.M.I. Río Salado; 2009), la laguna recibía aportes desde el río Salado manteniendo su cota por encima del nivel de descarga; mientras que, por efecto del dragado, esta condición ocurre para caudales superiores a 150 m³/s (P.M.I. Río Salado; 2009). De esta forma, para caudales del río inferiores a dicho valor, el escurrimiento es en sentido inverso y el nivel de la laguna depende únicamente de los aportes de la cuenca superior, lo que llevó a un descenso de su nivel de agua.

El objetivo de este estudio fue realizar un análisis de la influencia de una obra de control de nivel en la desembocadura de la laguna, para evaluar las implicancias ambientales de su funcionamiento ante distintos eventos extremos.

El estudio se llevó a cabo a partir de un análisis multitemporal de imágenes satelitales. Ello nos permitió tener un acercamiento en lo referido a la dinámica de la laguna durante eventos de inundación-sequía bajo diferentes escenarios. En este sentido, el análisis apuntó a conocer la dinámica de la laguna pre y post obra de dragado del río Salado (O.D.R.S.) realizada a fines de la década del 2000 y escenarios con y sin obra de terraplenado en el sitio de descarga de la laguna al arroyo San Miguel.

Para un año en particular se analizaron también las precipitaciones que pudieron afectar la zona.

Metodología y resultados

El trabajo con imágenes satelitales consistió en dos aproximaciones diferentes. Uno de mayor resolución espacial, pero de menor resolución temporal y otro inverso. El desarrollo de este

análisis se basa en mostrar y describir, considerando ciertas obras de arte, precipitaciones y relaciones entre las diferentes fechas elegidas.

Análisis multitemporal desde Google Earth

Se comenzó haciendo un barrido con Google Earth (resolución espacial inferior a 1m) buscando los momentos más extremos (inundación, sequía), con el objetivo de interpretar el funcionamiento de la laguna en condiciones de llenado y vaciamiento.

Surgieron fechas de interés como la inundación de diciembre de 2002, previo a la O.D.R.S. y a algún tipo de obra de terraplenado sobre la descarga de la laguna al arroyo San Miguel. Hacia abril del 2012, se encontró una situación de extrema seca con una importante disminución del área bajo agua de la laguna. La misma quedó desconectada del arroyo San Miguel y del Río Salado, siendo éste un momento posterior a la O.D.R.S. y no observándose aún un cierre en la laguna. Para mayo del 2017 se registró un evento húmedo de magnitud considerable, siendo este evento posterior a una obra de terraplenado en el sitio de descarga de la laguna. El último suceso climático extremo se corresponde con la sequía que azotó la región durante los años 2020, 2021 y 2023. Esta sequía fue considerada una situación récord, debido al prolongado tiempo transcurrido con escasas precipitaciones (Figura 2).



Figura 2: Cuatro momentos extremos (inundación – Sequía) de la laguna La Boca. En amarillo se observa el área del pelo de agua correspondiente a mayo del 2017 y solapado en el resto de las fechas.

Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Google Earth

Análisis multitemporal con imágenes Landsat

La segunda etapa de este análisis consistió en completar con información de otros sensores satelitales de menor resolución espacial a cada una de las fechas mostradas en la Figura 2. Para ello se revisó el catálogo de imágenes Landsat y Sentinel-2, con resoluciones de 30-15 metros y 10 metros respectivamente. La busqueda se realizó desde el año 2000 hasta la actualidad, encontrándose situaciones particulares que permiten explicar algo del comportamiento de la laguna. El uso de Sentinel-2 fue descartado para no traer redundancia y complejidad sin aportar más información.

Los momentos destacados para este estudio fueron: junio de 2000 – junio de 2002 – septiembre de 2015 - marzo, mayo y agosto de 2017 - septiembre, octubre y noviembre de 2018. Las fechas de las imágenes se observan en la Tabla 1.

Este análisis apuntó a situaciones de gran humedad en el área ya que, con sequía, el nivel de la laguna baja hasta desconectarse con el arroyo San Miguel y por ende con el río Salado

En la Figura 3 se observa la situación ocurrida para los años 2000, 2002 y 2015. El año 2000 muestra un desborde en el río Salado y en el arroyo San Miguel, pero la laguna se encuentra contenida dentro de sus límites. En ese entonces, no existía ningún tipo de obra en el río como en la laguna. Los años 2002 y 2015 destacan una situación de inundación plena en el área, pero para el año 2002, no existía en la zona ningún tipo de obra de las anteriormente mencionadas. Para el año 2015 la obra del río Salado en dicho sector ya había concluido. No podemos afirmar si para esta fecha (10/9/2015) existía algún tipo de terraplén en la descarga de la laguna pues no se lo observa, pero podemos inferir su existencia debido a que sí se aprecia en otras imágenes del mismo año.

Tabla 1: Fechas destacadas en el análisis multitemporal

Año	Mes	Día
2000	6	4
2002	6	10
2015	9	10
2017	3	7
2017	5	10 y 26
2017	8	14
2018	9	2
2018	10	4
2018	11	21

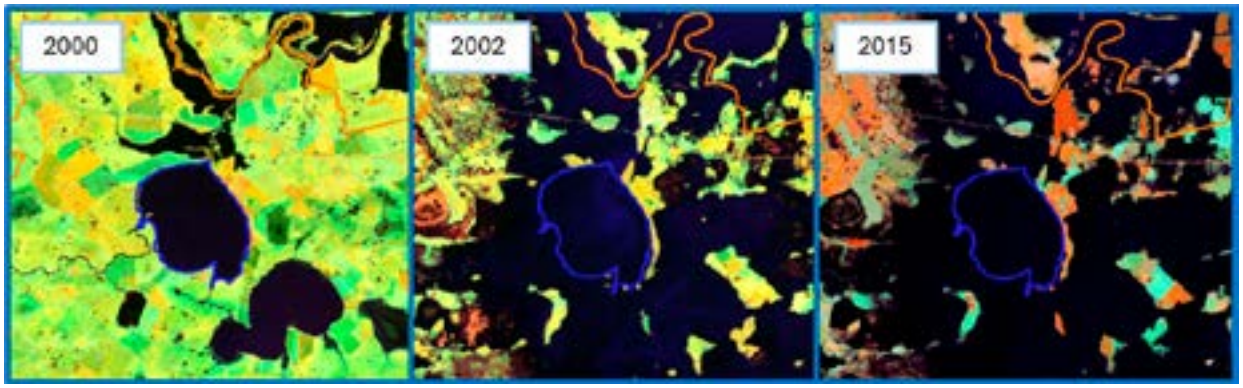


Figura 3: Imágenes Landsat del 4 de junio del 2000, 10 de junio del 2002 y 10 de septiembre de 2015 respectivamente que muestran la situación particular de la Laguna La Boca (Ex – San Lorenzo). En azul la envolvente de la laguna y en naranja parte de la traza del río Salado

La Figura 3 parece mostrar dos situaciones similares en 2002 y 2015, ambos bajo condiciones opuestas (Sin obras para el 2002 – con obras para el 2015). Para dar más certeza sobre esta información, en la Figura 4 se muestra una clasificación de agua/no agua utilizando álgebra de bandas de las imágenes en cuestión. La clasificación resalta en blanco aquellos píxeles que se presentaron bajo agua. Se puede ver que dichas imágenes son muy parecidas. La superficie bajo agua que arrojó esta clasificación para el área analizada fue de: 19.247 has para junio del año 2002 y 21.870 has para septiembre del año 2015.

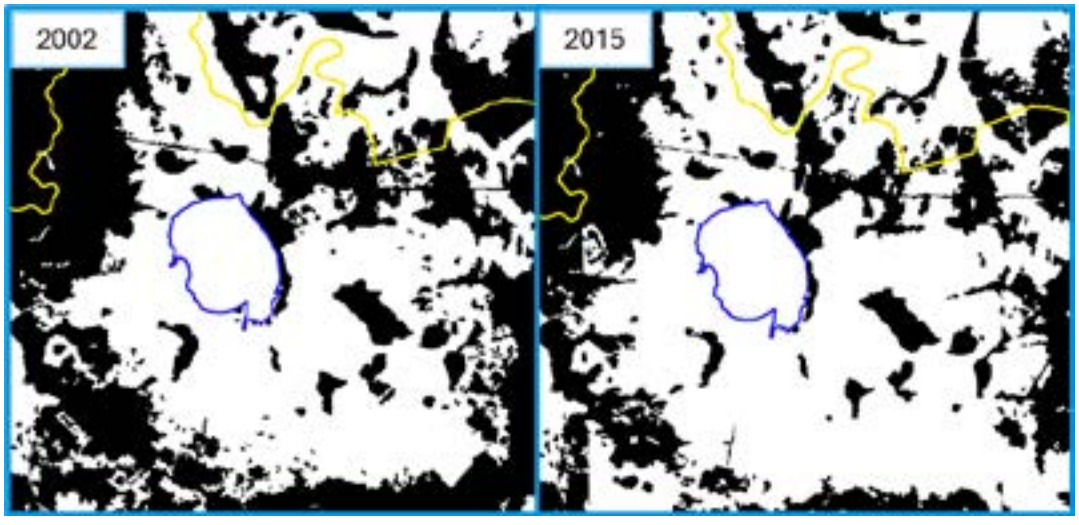


Figura 4: Algebra de bandas para clasificar agua en las imágenes de los años 2002 (izq.) y 2015 (der.). En blanco los sitios bajo agua. en negro aquellas áreas secas. En amarillo parte de la traza del río Salado y en azul el perímetro de la laguna.

Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Landsat y SIG

Con respecto a los años 2017 y 2018, el escenario es similar. Épocas húmedas y en ambos casos existe obra de terraplén en la descarga de la laguna. Solo para el año 2017 se analizaron las precipitaciones, para no redundar el estudio.

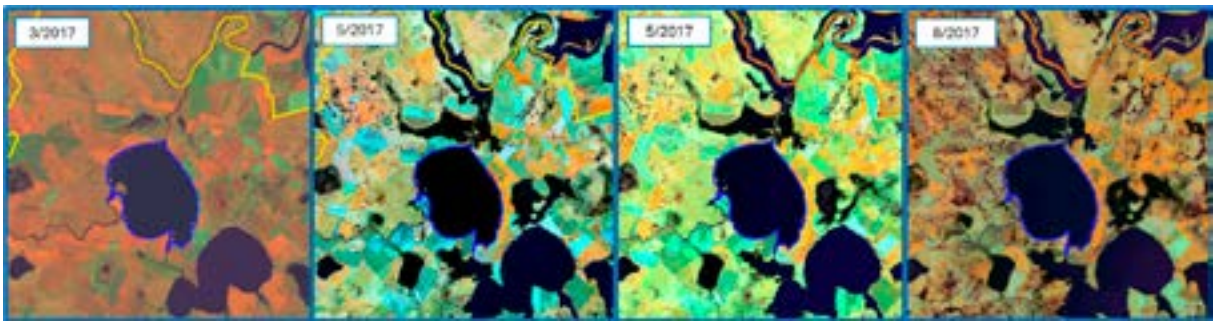


Figura 5: Imágenes Landsat del 7 de marzo, 10 y 26 de mayo y 14 de agosto de 2017 respectivamente que muestran la situación particular de la Laguna La Boca (Ex – San Lorenzo). En azul la envolvente de la laguna y en amarillo o naranja parte de la traza del río Salado.

Para el año 2017 (Figura 5), consideramos acertado mostrar 4 momentos diferentes y relacionarlos con las precipitaciones ocurridas en la zona. Para el mes de marzo la laguna estaba contenida dentro de sus límites, como así también el agua que circulara por los arroyos de entrada y salida y en el Río Salado. La situación cambia a partir de mayo con desborde en el arroyo San Miguel y en el río Salado. Se aprecia similar comportamiento sobre los bajos circundantes al arroyo San Miguel a lo mostrado y comentado en la imagen del año 2000, previo a cualquier obra (Figura 3). Sin embargo, para el año 2017 ya existía algún tipo de obra de terraplenado sobre la desembocadura de la laguna hacia el arroyo San Miguel, como asimismo el dragado del río Salado.

Con respecto a las precipitaciones, y con el objetivo de mostrar la certeza de un año húmedo, resultó pertinente considerar cómo se dieron las precipitaciones y hacer sobre ello un breve análisis para luego relacionarlo con el comportamiento del agua en el suelo de la zona. Se contó entonces con las precipitaciones diarias para 6 estaciones meteorológicas durante todo el 2017. Las estaciones se trabajaron de manera diferenciada en dos grupos. Una zona se corresponde con las estaciones de Dolores, Punta Indio y La Plata, ocupando éstas el sector cercano a la laguna, lo que considera la precipitación local. Por otra parte, las estaciones Las Flores, Azul y Tandil ubicadas hacia el suroeste la laguna, en un área aguas arriba de la misma.

En la Tabla 2 se muestran las precipitaciones ocurridas en el año 2017 y en la Tabla 3 la precipitación media de una serie de 30 años para las mismas estaciones. A simple vista, se observa que el año 2017 tuvo precipitaciones por encima de lo normal. Principalmente, en aquellas estaciones ubicadas aguas arriba de la laguna. Lo más destacado ocurrió en la estación Las Flores con 400mm más de lo normal.

Tabla 2: Precipitaciones mensuales correspondientes al año 2017. En verde y en naranja se resaltan meses que forman parte del análisis

Estaciones	Pp mensuales 2017												total anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Dolores	117,55	69,2	178,05	129,75	38,9	29,4	107,55	104,4	72,3	96,1	64	34,1	1041,3
La Plata	148,5	110,05	61,7	77,05	158,8	0,35	100,6	113,55	127,25	77,15	24,25	153,35	1152,6
Punta Indio	90,6	140	84,05	59,95	111,4	8,8	115,96	108,15	93,15	81,05	25,25	87,2	1005,55

Estaciones	Pp mensuales 2017												total anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Azul aero	51,65	165,05	102,4	85,4	104,65	79,85	41,05	94,7	164,65	75,95	65,4	49,15	1079,9
Las Flores	133,1	207,3	198,15	189,5	130,4	51,75	60,8	86,2	218,7	32,05	98,2	48	1894,15
Tandil	50,45	133,7	188,3	196,75	114,75	94,55	50,1	104,3	111,1	50,95	89,1	42,1	1176,15

Tabla 3: Precipitaciones medias mensuales correspondientes a la serie de 30 años desde 1991 al 2020. En verde y en naranja se resaltan meses que forman parte del análisis.

Estaciones	Pp medias 1991-2020												total anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Dolores	109,2	94,2	96,3	99,4	58,7	62,1	62,1	73,2	64,3	93,9	91,4	81,8	986,6
La Plata	111	112,8	106,5	98,2	78	58,6	78,7	67,5	71,4	101	95,3	93,7	1072,7
Punta Indio	97,4	116,1	94,8	93,8	67,5	69,3	82,5	68,9	77,2	95,9	94,8	82,3	1040,5

Estaciones	Pp medias 1991-2020												total anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Azul aero	103,8	101,6	113,9	90,6	55,7	37,1	40,8	59,2	67,5	92	97,9	75,4	935,5
Las Flores	98,3	104,5	118,8	105,9	61,4	52,5	49,9	57,1	65,4	102,6	92,7	71,6	980,7
Tandil	108,8	98,5	91,6	93,5	56	48,6	41,1	57,5	58,7	85,9	98,4	74	912,6

A partir de estos datos, podemos afirmar que en la zona de las estaciones aguas arriba de la laguna, llovió para dicho año un 30% más de la media, mientras que para el área de la laguna no hay diferencias.

Considerando únicamente las estaciones agua arriba de la laguna observamos que el porcentaje promedio de agua caída en el año 2017 supera ampliamente el porcentaje de agua caída normal durante los últimos 30 años. Superando en un casi 10 % para el período de febrero a mayo. Principalmente en las estaciones Tandil y Las Flores con diferencias de 12 y 13 % respectivamente. En el período junio - agosto, fueron meses con excesos, pero no tan marcados.

Finalizamos el análisis de imágenes satelitales observando lo ocurrido en el año 2018, previo a que comience un período de varios años con precipitaciones menores a lo normal, llegando a una importante situación de sequía. Para este año, mostramos tres fechas consideradas húmedos y recordando que existe una obra de terraplenado en la salida de la laguna (Figura 6).

Para septiembre de 2018 la laguna y los cursos de agua de entrada y salida se encuentran contenidos dentro de sus límites. Se observa algo de humedad en los suelos del lugar, siendo esto propio de la época del año donde el balance hídrico suele ser positivo debido a las bajas temperaturas. Para octubre del 2018 se observa gran cantidad de agua, mostrando suelos inundados. Lo propio ocurre con los bajos circundantes al río Salado y al arroyo San Miguel, donde los suelos aledaños de escasa pendiente poseen un lento a muy lento escurrimiento.

Para noviembre la situación se presenta con mayor normalidad, quedando aún por drenar aguas contiguas al arroyo San Miguel y al río Salado.

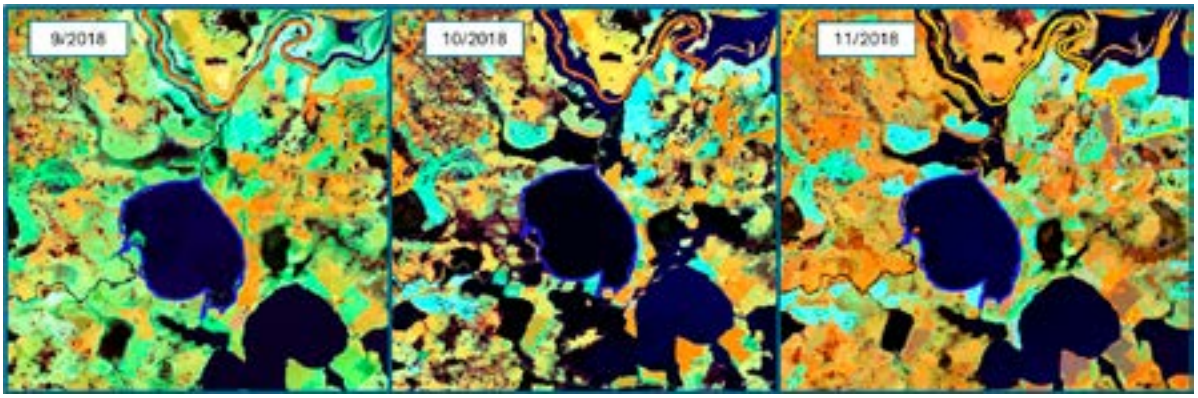


Figura 6: Imágenes Landsat del 2 de septiembre, 4 de octubre y 21 de noviembre de 2018 respectivamente que muestran la situación particular de la Laguna La Boca (Ex – San Lorenzo). En azul la envolvente de la laguna y en amarillo o naranja parte de la traza del río Salado.

Discusión y Conclusiones

El análisis cualitativo a partir de las imágenes satelitales permitió concluir que las intervenciones humanas (dragado del río Salado + terraplén a la salida de la laguna), han modificado la dinámica hídrica de la zona de manera diferente según distintas situaciones: a) en caso de eventos de inundación, tales como los ocurridos en 2002 y 2015, no morigeran los impactos generados dando como resultado que la situación es la misma con y sin intervención humana, b) para situaciones intermedias de humedad la retención de agua en la laguna por un terraplén ralentiza su paso hacia el arroyo San Miguel y c) para situaciones de sequía el nivel de la laguna se mantiene muy por encima de lo que lo haría sin terraplén. Estas diferencias pueden observase en la Figura 2 comparando el año 2012 (sin obras) con 2023 (con obras).

Con respecto al análisis de las precipitaciones, podemos decir que lo ocurrido concuerda con lo observado en las imágenes satelitales para el año 2017, donde la principal entrada de agua a la laguna ocurre desde el sector suroeste, coincidentemente con las precipitaciones ocurridas en dicho sector.

La teledetección resultó de gran importancia a la hora de analizar sitios donde los datos no abundan. Es posible generar nueva información, hacer análisis en retrospectiva, validar modelos, etc. Este tipo de análisis, basados en información remota, respalda la importancia de integrar estudios climáticos, de teledetección, de modelación y de infraestructura para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Bibliografía

COMISION NACIONAL DE ACTIVIDADES ESPACIALES. Catálogo de imágenes. https//www. https://catalogos.conae.gov.ar/DIRECCIÓN PROVINCIAL DE HIDRÁULICA (2009).

MUNICIPALIDAD DE PILA. Proyecto de Obra de Control de Vuelco al Río Salado en Correspondencia con el Arroyo San Miguel y Laguna San Lorenzo. Plan Maestro Integral del Río Salado.

SARAFIAN, PAULA. 2005-2006. Cuenca del río Salado de Buenos Aires.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN). Datos abiertos disponibles en la página web: https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos-

MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO: ANÁLISIS DE EVENTOS REGISTRADOS EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN LA PLATA, BERISSO Y ENSENADA

Espil Nosa, Francisco H.; Del Rosario, Danilsso; Bianchi, Guillermo J.; y Angheben, Enrique

Grupo InfoMet, UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 47 N° 200

contacto.infomet@gmail.com; francisco.espil@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Continuando con estudios anteriores [Ref 1 y 2], este trabajo aborda en forma experimental, el análisis y discusión de datos de estaciones existentes en la región de La Plata y sus alrededores, emplazadas en las cuencas de los arroyos Martín-Carnaval, Rodríguez, del Gato y Maldonado. En este caso, se analizó el evento meteorológico de mediana intensidad conocido popularmente como "Tormenta de Santa Rosa", que ocurrió entre el 30 de agosto y el 1 de septiembre de 2024 en la ciudad de La Plata. Este evento, caracterizado por precipitaciones significativas y ráfagas de viento, causó anegamientos urbanos incluyendo daños en la infraestructura. Consecuentemente, los estudios de InfoMET destacan la importancia de monitorear y comprender las dinámicas hidrometeorológicas locales a fin de mitigar riesgos asociados.

El análisis se fundamenta en datos registrados por la estación meteorológica automática (EMA) del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) en el marco de un análisis espacio-temporal, al compararlos con registros de otras 16 estaciones de la región en áreas urbanas y periurbanas.

La estación, equipada con sensores de precipitación, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, y velocidad del viento, registró una acumulación total de 62 mm de precipitación y ráfagas de viento de hasta 32 km/h durante el evento.

Descripción del evento - Registros

Según la creencia popular cada 30 de Agosto (conmemoración de Santa Rosa de Lima), es esperada la "llegada de la tormenta". Aun aceptando que ello ocurra unos días antes o después de esa fecha, el carácter de mito, saber popular o posible realidad, actualiza la discusión, incluso a niveles académicos [Ref.3].

El fenómeno se observa frecuentemente, en estas latitudes y al final del invierno, constituyendo una de las primeras tormentas al inicio de la primavera, cuando la atmósfera es sometida a cambios en su circulación que favorece la presencia de aire cálido y húmedo y condiciones que estimulan su desarrollo.

Se podría decir que el evento del año 2024 llego con puntualidad, por primera vez, en seis años de registros, si es que ese dato resulta relevante. Sin embargo, las imágenes tomadas por los vecinos en diferentes puntos de la ciudad permiten constatar la ocurrencia de daños de considerable magnitud. Estos daños incluyen la rotura de ramas de gran tamaño y anegamiento de calles.

La EMA del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, ubicada en la terraza del Departamento, registró en el lapso de las 11:40 a.m. del día 30 de agosto hasta 6:15 a.m. del día 1 de septiembre una acumulación de 62 mm de precipitación.

A lo largo del evento se registraron dos picos de marcada intensidad que comienzan y acaban bruscamente, con duración relativamente corta, los mismos fueron de 38,4 mm/hs a las 5:10 a.m. y de 31,2 mm/hs a las 08:10 a.m. del día 31 de agosto del 2024.

Tal como puede observarse en la **Figura 1** de variación horaria los picos de intensidad media para intervalos de 5 minutos coinciden con los mayores saltos de la curva masa del evento.

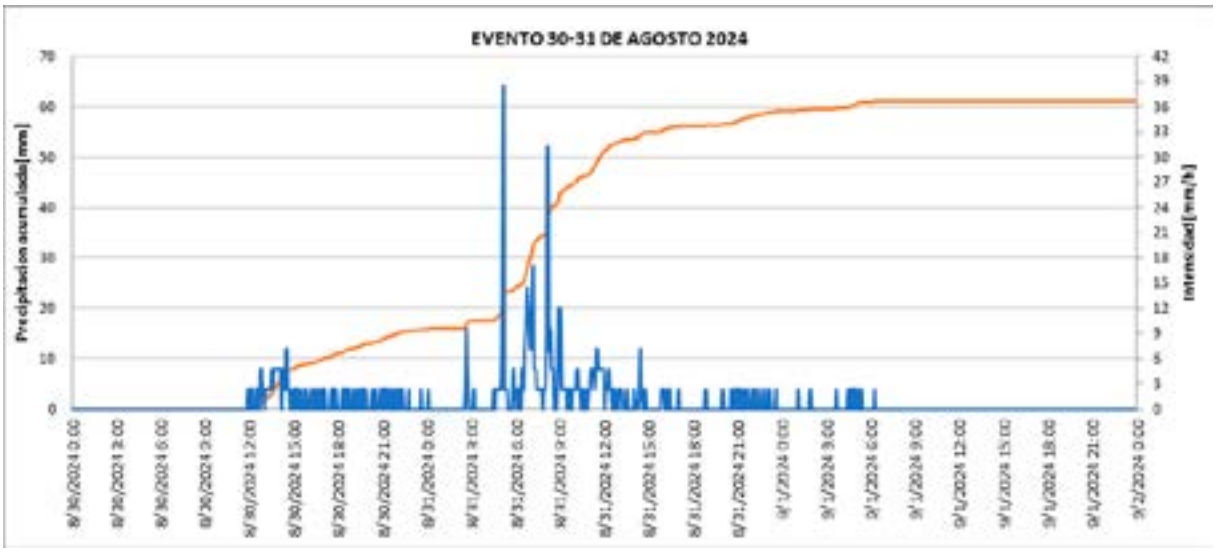


Figura 1 – Variación temporal de las precipitaciones acumuladas e intensidades – EMA InfoMET I

La **Figura 2** presenta la curva masa del evento completo proporcionada por el pluviógrafo de la estación meteorológica.

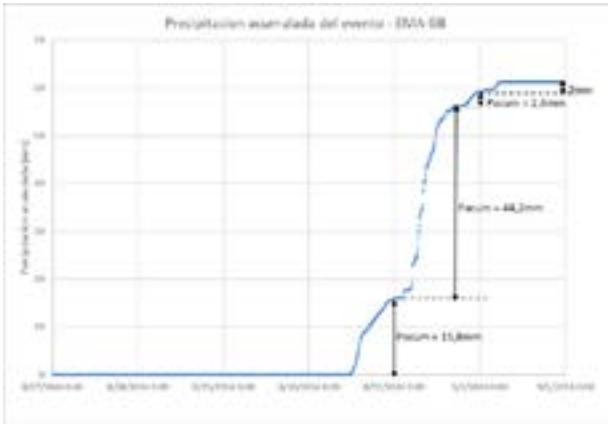


Figura 2 – Evolución de la precipitación acumulada en la EMA InfoMET I durante el evento

En cuanto a la evolución temporal de las variables meteorológicas, el día viernes 30 se observó un aumento de temperatura, en un rango de 11°C a 13°C entre las 03 y 10 horas, con un pico máximo de 15 °C registrado a las 18 horas del día 1 de septiembre una vez finalizado el evento, y durante este se mantuvieron temperaturas por debajo de los 11°C, a su vez se mostró un descenso de la presión atmosférica y un aumento de la humedad relativa, sin perder de vista la relación intrínseca de todas estas variables meteorológicas, como se indica gráficamente en las **Figura *3*** y **Figura *4***

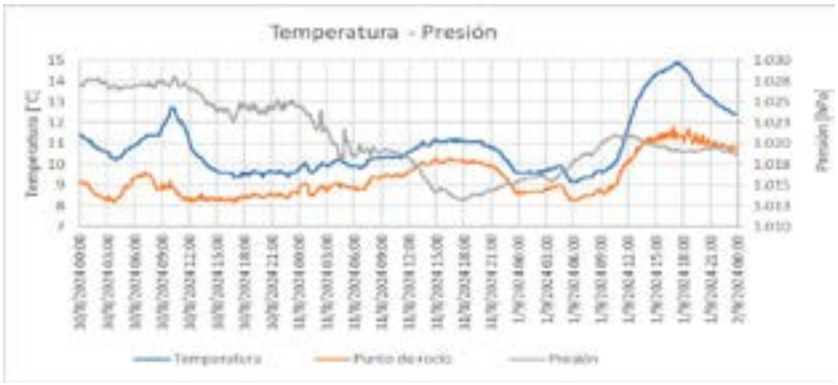


Figura 3 – Variación temporal de la temperatura, punto de rocío y la presión atmosférica– EMA InfoMET I

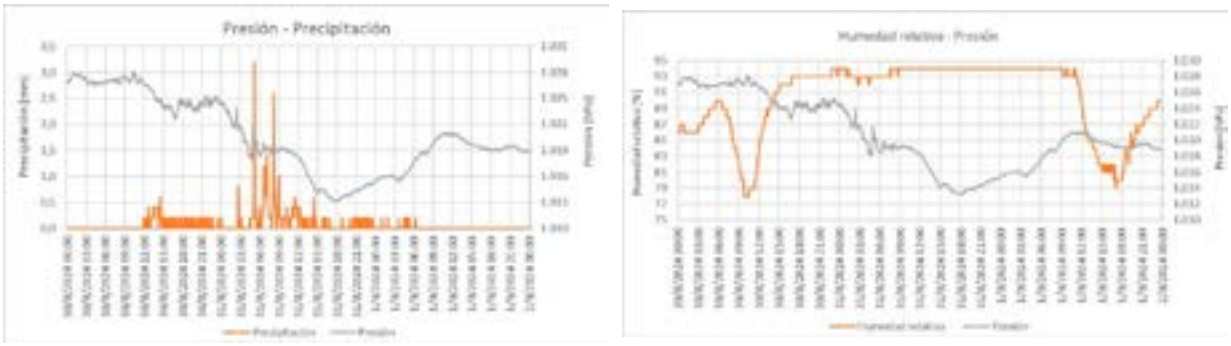


Figura 4 – Variación temporal de la precipitación, humedad relativa y presión atmosférica– EMA InfoMET I

Mas allá de la variable precipitación que se analiza aparte, el evento mostró correlaciones claras entre las variables temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Durante la tormenta, las temperaturas fueron relativamente bajas, mientras que la presión descendió y la humedad alcanzó niveles casi saturados. Estos patrones son característicos de sistemas de baja presión asociados a tormentas frontales.

Red de estaciones de la región

Con el objeto de validar la coherencia espacial y temporal de los registros obtenidos, se contrastaron los datos propios con estaciones meteorológicas cercanas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.), Autoridad de cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) y las estaciones privadas (red informal) particularmente la organizada en torno a la página de Weather Wunderground (Las estaciones recopiladas de la página Web conservan su denominación original). La **Figura *5*** muestra la distribución espacial de las estaciones meteorológicas que disponen datos de precipitación acumulada durante los días 30/8 al 1/09.



Figura 5 – Ubicación de las estaciones privadas

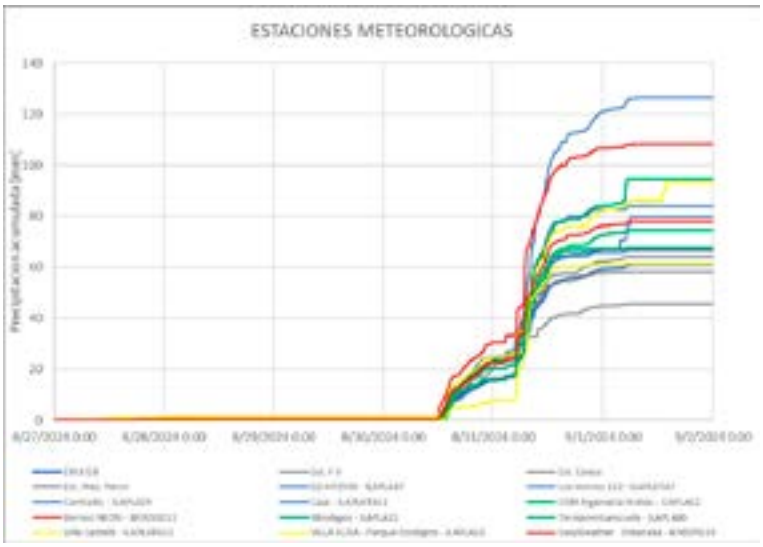


Figura 6 – Curvas masas de las 16 estaciones analizadas para el evento.

En la **Figura *6*** se muestra la evolución de las curvas masas del conjunto de las estaciones estudiadas. En principio, se adoptó sub-agruparlas por sectores, de acuerdo con el siguiente criterio:

- Casco Urbano de La Plata (color azul): comprende las estaciones de ILAPLA29, ILAPLA87, ILAPLA22, ILAPLA62, ILAPLA7 y la estación de referencia EMA InfoMET I.

- Ensenada y Berisso (color rojo): comprende las estaciones de IBERISSO11 e IENSEN159
- Villa Elisa y Gonnet (color amarillo): ILAPLATA12 e ILAPLA22
- Externo y Alrededores del casco urbano (color verde): ILAPLA21 e ILAPLA66
- Otras estaciones: ACUMAR (color gris): Est. F.V, Est Ezeiza, Est. Presidente Perón.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un análisis generalizado se propone al menos, poder detectar las diferentes fuentes de error de cada estación. Las causas más comunes de las diferencias de lectura entre estaciones identifican tres aspectos: a) la naturaleza del evento, a través de la variabilidad de la precipitación y el desplazamiento de la tormenta; b) los errores debidos al mal emplazamiento de la estación (la mayoría no verifica las condiciones de emplazamiento recomendadas por los Organismos). Además, en ambientes urbanos existe mayor dificultad para sostener esos criterios, por ejemplo, los edificios de la ciudad ofrecen a veces una exposición desfavorable frente a la precipitación, y c) Al estar tratando con estaciones informales algunas suelen tener fallos y contingencias sorpresivas más o menos fáciles de resolver, que quedaran bajo criterio de quien evalúe, la posibilidad de corregirlas adecuadamente.

El análisis de cada sector de los sectores reagrupados arrojó los siguientes resultados.

Sector: Casco urbano de La Plata (color azul)

Al analizar esta zona se comprobó que la precipitación estaba dentro del orden esperado. Se encuentran diferencias, algunas difusas que no permiten distinguir apropiadamente la causa de la variabilidad. Tratando con estaciones informales algunos fallos es posible corregir. Tal es el caso de la estación ILAPLA29 que presento una variación considerable en 5 min.

La precipitación acumulada media del evento que se registro en esta zona fue aproximadamente 70mm, siendo la estación EMA InfoMET I la que menor precipitación registro (62mm), no hay que perder de vista la ubicación de cada estación, en este caso la EMA InfoMET I se encuentra ubicada en la terraza del edificio del Departamento de Hidráulica rodeada en una lateral por una fila de voluminosos arboles lo cual influye, además de la intensidad del viento, según la orientación que tenga la gota al caer.

La estación ILAPLA87 se encuentra ubicada en la terraza del Instituto de Limnología Dr. Raúl A. Ringuelet, mientras que la estación ILAPLA29 se encuentra ubicado en el tercer piso en un edificio en la calle 61 entre las calles 9 y calle 10 y que la estación ILAPLA22 se encuentra cerca a la estación de Tolosa a una altura de 12m.

Sector: Ensenada y Berisso:

Del análisis de esta zona se destaca su cercanía a la línea costera, y su efecto local, considerando que el evento se desplaza en espacio y tiempo, por lo que esperamos una diferencia entre las estaciones cercanas al casco urbana, para esta zona se analizaron las estaciones IBERISSO 11 se encuentra a una altura de 4m de la zona cota del del terreno de la vivienda donde se encuentra ubicado mientras que la estación IENSEN159 se encuentra en el jardín de una vivienda a una distancia de 1m de la cota del terreno de la vivienda.

Sector de Zona Norte (Villa Elisa, Gonnet):

Para esta zona se utilizaron las estaciones ILAPLA12 e ILAPLA22, la estación ILAPLA22 se encuentra en Villa Elisa en una vivienda unifamiliar ubicada a una altura de 3m de la cota del terreno de la vivienda mientras que la estación ILAPLA12 se ubica en Villa Castells en una vivienda unifamiliar a una distancia de 4m sobre la cota del terreno de la vivienda.

Sector Externo y de alrededores del casco urbano de La Plata (Brandsen, Villa Elvira, Parque Sicardi):

Al analizar estas estaciones nos dio como resultados precipitaciones menores a las demás estaciones, si bien están en la zona alejada del casco urbano, menos afectada por la edificación, la mayor distancia y ante la espacialidad del evento muestran una relativa uniformidad; para esta zona se utilizaron las estaciones de ILAPLA21, ILAPLA66 e ILAPLA62

Otras estaciones. (SMN, y otras)

En las **Figura 7** y **Figura 8** se muestran los datos proporcionados por estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), representativas de estaciones validadas por Organismos y que cumplen condiciones de emplazamiento adecuadas. En este estudio, se utilizaron las estaciones del Aeropuerto Ezeiza y de La Plata Aeródromo, los datos de precipitación mostrados son cada 6 horas y cada 24 horas (acumulado diario) ya que no se dispuso de datos de pluviógráfos. De los registros fuente, se corrigió el desfasaje de 3 horas del sistema horario (UTC).

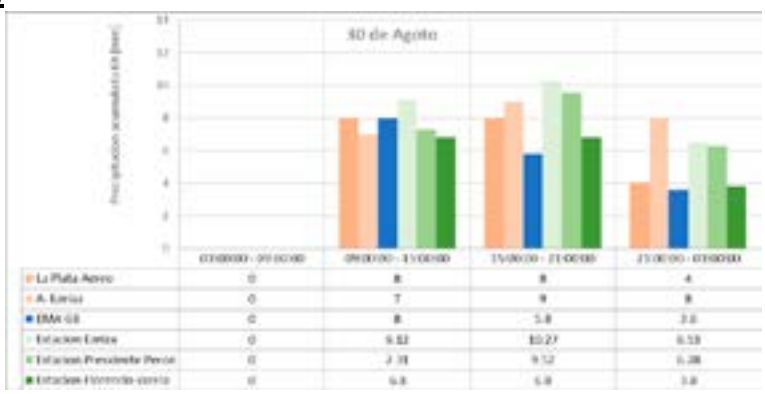


Figura 7 – Gráfico de barras de las estaciones de ACUMAR, SMN y EMA InfoMET I para 30/8

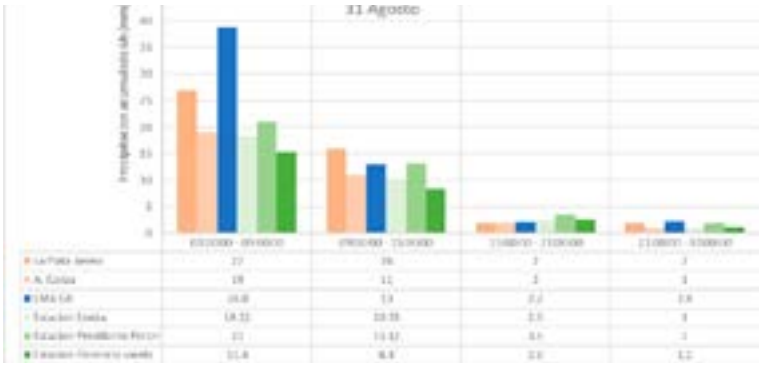


Figura 8 – Gráfico de barras de las estaciones de ACUMAR, SMN y EMA InfoMET I para 31/8

El gráfico muestra la variación temporal de la precipitación acumulada cada 6 horas en grafico de barras. Presentan el mismo comportamiento,pero en distinta magnitud dada el distanciamiento entre estaciones (espacialidad del evento) y todas muestran dos máximos que se da el día 31 de agosto entre las 3:00 – 9:00 y entre las 9:00 – 15:00 donde la máxima precipitación acumulada cada 6 horas se da entre las 3:00 – 9:00.

Discusión 1

La primera cuestión que atraviesa este trabajo conduce a la discusión de la fecha, siendo entendible que las condiciones atmosféricas propicias se darán con mayor probabilidad en un intervalo de días centrado (no necesariamente) en el 30 de agosto. Las estadísticas del SMN, basándose en 118 años de datos de la estación Villa Ortuzar (CABA),demuestran que en el 57% de los casos se producen tormentas alrededor de esa fecha, pero, no siempre acompañadas de lluvia intensa o granizo.

Para nuestra estadística, con sólo seis años de muestra, este es el primer evento con carácter de tormenta.

Discusión 2

Este tipo de eventos, si bien resultó de mediana intensidad estuvo caracterizado por precipitaciones y ráfagas de viento que afectaron el desarrollo cotidiano. La severidad del evento, el viento principalmente, potencio los errores provenientes de una captación ineficiente observando que en ambientes urbanos la variabilidad aumenta. Por otra parte, durante el tiempo severo se aumenta la probabilidad de fallas en las estaciones informales. Los estudios comparativos entre las estaciones permiten identificar muchas de las limitaciones operativas en este tipo de redes meteorológicas, en nuestro caso por contraste de datos, algunas fueron corregidas, mejorando los resultados.

Los resultados obtenidos sobre el comportamiento a escala local y luego extendido a nivel regional consideraron una secuencia de análisis por subsectores, de modo de distinguir entre diferencias provenientes de la naturaleza de la tormenta de aquellas originadas por el mal emplazamiento y el efecto del viento, y el ambiente urbano.

Ahora bien, la curva masa media del conjunto de estaciones, refleja el grado de uniformidad observada a lo largo del evento, el que es acompañado también por nuestra estación EMA InfoMET I. En este sentido, se verificó una conclusión resaltada en trabajos anteriores (Ref.1) en cuando a que distribución espacial de las precipitaciones en las cuencas de la región puede ser aceptablemente interpretado con una red mínima de estaciones. Las estaciones reales de la región (16 utilizadas en este estudio) conducen a una elección racional de entre tres y cinco estaciones, correctamente distanciadas y aceptablemente emplazadas. Los resultados obtenidos validan la utilidad de los sistemas de monitoreo automático como herramientas. Al estudiarlas sobre las bases robustas que establece la ciencia hidrológica las redes informales brindaron información adicional sobre comportamientos en ambientes urbanos, justamente, donde escasean los datos "oficialmente validados". Por otra parte, ofrecen una buena oportunidad para continuar experimentando con el fortalecimiento de las capacidades técnicas y operativas de las redes de monitoreo.

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA

A partir del interés convocante propiciado por la "Tormenta de Santa Rosa" se analizaron registros de nuestra estación entre el 30/AGO y 1/SET/24 en la ciudad de La Plata, intentando con datos más certeros y consistentes, aportar mayor conocimiento a la cuestión atravesada por esta creencia popular.

Este evento, caracterizado por precipitaciones significativas y ráfagas de viento, causó anegamientos urbanos y daños, evidenciando la importancia de monitorear y comprender las dinámicas hidrometeorológicas locales para mitigar riesgos asociados.

Se logró estudiar el comportamiento de la estación EMA InfoMET I durante un evento particular de lluvia intensa.

El estudio del comportamiento alcanzó la escala local y la escala regional, en base a 16 estaciones.

Los resultados obtenidos no solo validan la utilidad de los sistemas de monitoreo automático como herramientas, sino que también subrayan la importancia de continuar con el fortalecimiento de las capacidades técnicas y operativas de las redes de monitoreo.

[Ref.1] Jornadas ITE, (2019). "**Análisis de eventos registrados en estaciones meteorológicas** " y "**Evaluación de la representatividad espacial de las estaciones** UIDET Hidrología. Fernández, G., Garat, F., García, A. Espil Nosa, F. y Bianchi G.

[Ref.2] Jornadas ITE, (2021). "**Análisis de estaciones de La Plata en forma no presencial**" y "**Propuesta de mejora de la red pluviométrica de La Plata**". UIDET Hidrología. Andrade Macias Foti, P; Caruso, I. S.; Andrada Frau, F; Espil Nosa, F; Garat, F. I.; y Bianchi, G. J.

[Ref.3] https://www.uba.ar/ubaciencia/noticias/397: "Tormenta de Santa Rosa, ciencia y mito"

MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO: EXPERIENCIAS, TENDENCIAS, Y LIMITACIONES EN LOS PRIMEROS AÑOS DE LA EMA INFOMET

Espil Nosa, Francisco H.; Del Rosario, Danilsso; Bianchi, Guillermo J. y Lacunza, Esteban

Grupo InfoMet, UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 47 N° 200

contacto.infomet@gmail.com; francisco.espil@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de fortalecer el conocimiento y seguimiento de los fenómenos hidrometeorológicos que afectan a la región, alumnos y docentes de UIDET Hidrología conformaron en 2016 un grupo de trabajo (INFOMET) con capacidad para adquirir, centralizar y manejar datos para la previsión y estudio de tales eventos.
La Estación Meteorológica Automática InfoMET I, opera desde el año 2018. Sus investigaciones análisis y resultados han sido presentados en las últimas jornadas ITEEs 2019 y 2021. [Ref 1 y 2].

PARTE EXPERIMENTAL

La Estación Meteorológica Automática InfoMET I está equipada con un pluviógrafo de cangilones, anemómetro, y sensores de temperatura, humedad, radiación y presión. Ubicada en la terraza del Departamento de Hidráulica de la Facultad (**Figura 1**), a una altura aproximada de 2 metros sobre la superficie de la terraza, y a una altura total de aproximadamente 10 metros sobre el nivel del terreno natural. El sistema de medición se complementa con un pluviómetro tipo B, por lo que los valores acumulados registrados con la EMA de los eventos son contrastados, con dicho totalizador.



Figura 1 – EMA InfoMET I –F.I.-U.N.L.P.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Continuando con los desarrollos antecedentes del grupo y con los objetivos allí propuestos, este trabajo expone las experiencias acumuladas durante los primeros años de operación de la estación, abordando diversos desafíos encontrados en la recolección de datos, incluyendo tanto interrupciones por fallas de software, energía, memoria de almacenamiento o transmisores, como los avances logrados en la mejora de la calidad de los datos y su procesamiento.
En la validación de los datos se sumaron becarios y alumnos de PPS logrando que varios de estos periodos con faltantes o interrupciones fueran completados, perfeccionando así la metodología.
Si bien se cuenta con registros subhorarios, en el marco del presente trabajo se presentan resultados mensuales. Estos registros fueron contrastados y validados con estaciones de referencia de organismos tales como Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.), Instituto

Nacional de Tecnología Agropecuaria (I.N.T.A.) y La Estación Meteorológica Automática La Plata Observatorio, de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAyG-UNLP), entre otras.

Periodo de funcionamiento

La fecha de instalación y puesta en funcionamientos de la estación es 07/JUN/2018. Se adopta como fecha de corte final para la presente publicación 31/DIC/2024.
Con el fin de ordenar y ser claros con los resultados se subdivide en capítulos por variables:

Temperaturas

En las **Tabla *1*** a **Tabla *3***, se muestran los resúmenes mensuales de temperaturas máximas, promedios y mínimas registradas.
Se han registrados temperaturas entre 1,0°C a 42°C. Si bien se han registrados temperaturas bajo 0°C en estaciones periurbanas en el periodo, la EMA InfoMET I corrobora comportamientos de estaciones urbanas, respecto a las temperaturas mínimas en periodos invernales, en particular en el mes de JULIO 2020 registrando temperatura mínima de 1,1°C. Con respecto a las temperaturas máximas, se han registrado 41,9°C en el mes de Enero de 2022, siendo consistentes con lo registrado por La Plata Aero del S.M.N. (41,0°C), y La Estación Meteorológica Automática La Plata Observatorio, de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAyG-UNLP) (41,7°C).

Tabla 1 – Temperaturas máximas mensuales

TEMPERATURA MAXIMA MENSUAL												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2024	34.1	36.4	30.7	26.9	21.3	26.2	21.2	27.9	28.7	33.2	34.1	34.3
2023	35.6	39.3	39.2	28.6	24.8	23.8	25.1	28.4	25.4	28.8	32.1	34.6
2022	41.9	35.2	31.3	26.9	23.6	17.7	21.4	27.2	26.7	33.1	35.4	38.7
2021	35.1	32.8	32.2	28.2	26.5	20.8	22.4	27.1	25.1	34.8	35.4	37.6
2020	36.2	35.8	33.8	27.5	24.6	25.1	23.9	24.4	27.4	31.0	33.9	33.6
2019	35.9	35.3	32.7	30.2	25.4	21.7	24.2	23.9	28.9	29.9	36.3	37.2
2018	*	*	*	*	*	19.8	16.2	25.3	28.2	29.4	33.1	31.0
MAX	41.9	39.3	39.2	30.2	26.5	26.2	25.1	28.4	28.9	34.8	36.3	38.7

**Nota: no se muestran valores ya que la fecha de instalación e inicio de registros es 07/JUN/2018*

Tabla 2 – Temperaturas medias promedio mensuales

TEMPERATURA PROMEDIO MENSUAL												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2024	24.7	25.0	22.1	18.1	12.2	13.5	9.8	11.8	16.3	19.4	21.4	21.5
2023	25.1	24.9	25.5	17.9	15.9	12.6	12.1	13.0	13.9	16.5	20.3	22.2
2022	25.2	22.3	20.2	17.8	13.1	9.9	11.7	12.5	15.6	17.5	22.0	24.1
2021	24.1	22.7	21.3	20.1	14.4	11.4	11.3	12.1	14.8	18.1	20.8	23.4
2020	24.3	23.4	23.0	17.1	14.4	12.3	10,2	13.0	14.0	16.3	20.7	22.9
2019	24.3	23.4	20.3	18.0	15.2	13.8	10.9	11.7	14.2	16.7	21.8	22.8
2018	*	*	*	*	*	10.7	9.9	11.6	16.2	17.2	20.6	20.6
PROM	24.6	23.6	22.1	18.2	14.2	12.0	10.9	12.3	15.0	17.4	21.1	22.5

**Nota: no se muestran valores ya que la fecha de instalación e inicio de registros es 07/JUN/2018*

Tabla 3 – Temperaturas mínimas mensuales

TEMPERATURA MINIMA MENSUAL PROMEDIO												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2024	15.9	13.1	13.5	9.4	2.2	1.7	1.3	3.2	8.2	7.6	10.5	9.9
2023	17.2	8.3	12.6	8.3	6.6	3.0	2.3	4.1	5.4	1.9	9.3	12.1
2022	13.8	12.8	8.7	6.8	3.1	2.6	2.8	2.7	8.3	6.6	7.9	13.1
2021	14.3	14.1	7.7	10.2	4.8	2.6	2.0	3.0	6.2	6.2	8.3	15.3
2020	12.6	11.4	15.4	7.9	8.3	3.0	1.1	1.2	6.2	5.3	11.2	11.1
2019	13.2	11.6	10.4	11.1	7.9	4.2	1.4	1.8	1.8	4.8	11.1	10.6
2018	*	*	*	*	*	1.2	2.7	2.9	7.2	5.9	7.6	9.0
MIN	12.6	8.3	7.7	6.8	2.2	1.2	1.1	1.2	1.8	1.9	7.6	9.0

**Nota: no se muestran valores ya que la fecha de instalación e inicio de registros es 07/JUN/2018*

Humedad relativa

Muestra patrones consistentes de variación anual en comparación con estaciones de la región, registrando humedades relativas entre 31% en OCT 2023 a 98% SEP 2021, con un promedio de 74%.En la **Figura *2*** se muestra el patrón promedio mensual de la humedad relativa junto con la temperatura promedio mensual.

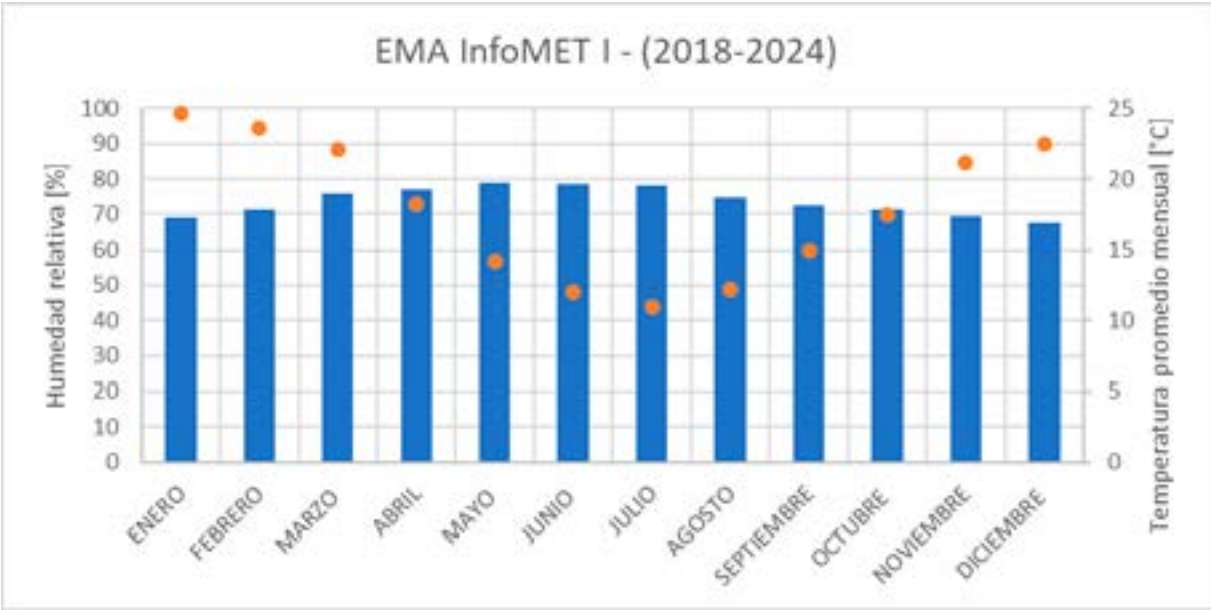


Figura 2 – Humedad relativa mensual promedio para el periodo de funcionamiento (2018-2024)

Presión atmosférica

Muestra patrones consistentes de variación anual en comparación con estaciones de la región, registrando presiones atmosféricas entre 999 hPa en DIC 2020 a 1035 hPa en JUL 2018, con un promedio de 1016 hPa. En la **Figura *3*** se muestra el patrón promedio mensual de la presión atmosférica junto con la temperatura promedio mensual.

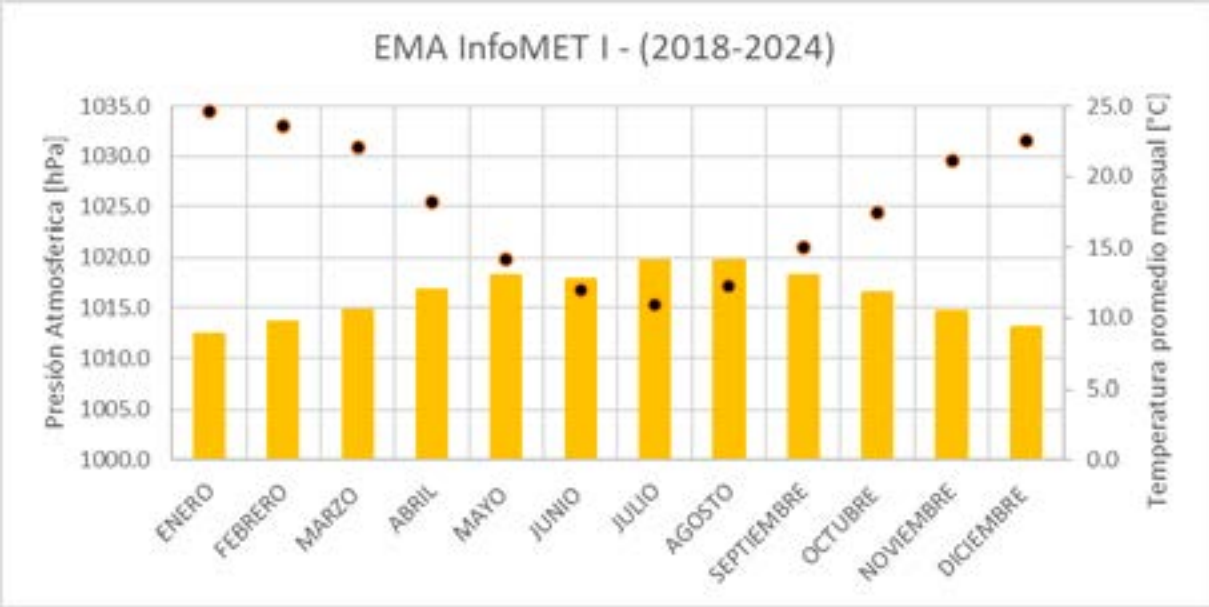


Figura 3 – Presión atmosférica mensual promedio para el periodo de funcionamiento (2018-2024)

Precipitación

En la **Tabla *4*** se muestran las precipitaciones mensuales acumuladas para el periodo de funcionamiento de la estación, registrando acumulados mensuales entre 1,00mm en JUN del 2023, y 335,2 mm en MAR del 2024, consistentes con estaciones de la región.
En la **Figura *4*** se muestran los mismos registros comparados con los promedios mensuales de la estación de La Plata Aero del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.)

Tabla 4 – Precipitaciones acumuladas mensuales

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2024	24,2	225,6	335,2	158,5	10,0	48,2	7,6	94,8	16,4	31,2	81,2	23,0
2023	35,3	20,8	25,8	28,2	91,6	1,0	36,8	100,6	32,6	29,3	150,6	125,9
2022	89,6	53,6	66,8	54,2	28,4	1,4	39,0	34,0	10,7	28,7	36,4	72,0
2021	80,9	158,4	81,2	69,5	75,1	9,4	38,2	36,2	75,6	25,3	66,1	2,0
2020	54,0	75,4	121,1	124,7	19,4	114,6	11,5	37,0	59,8	95,6	40,8	18,2
2019	91,0	138,6	75,0	43,4	50,0	125,4	133,4	33,2	23,8	147,2	34,6	77,2
2018						6,8	83,6	47,4	123,8	7,8	152,6	161,0

**Nota: no se muestran valores ya que la fecha de instalación e inicio de registros es 07/JUN/2018*

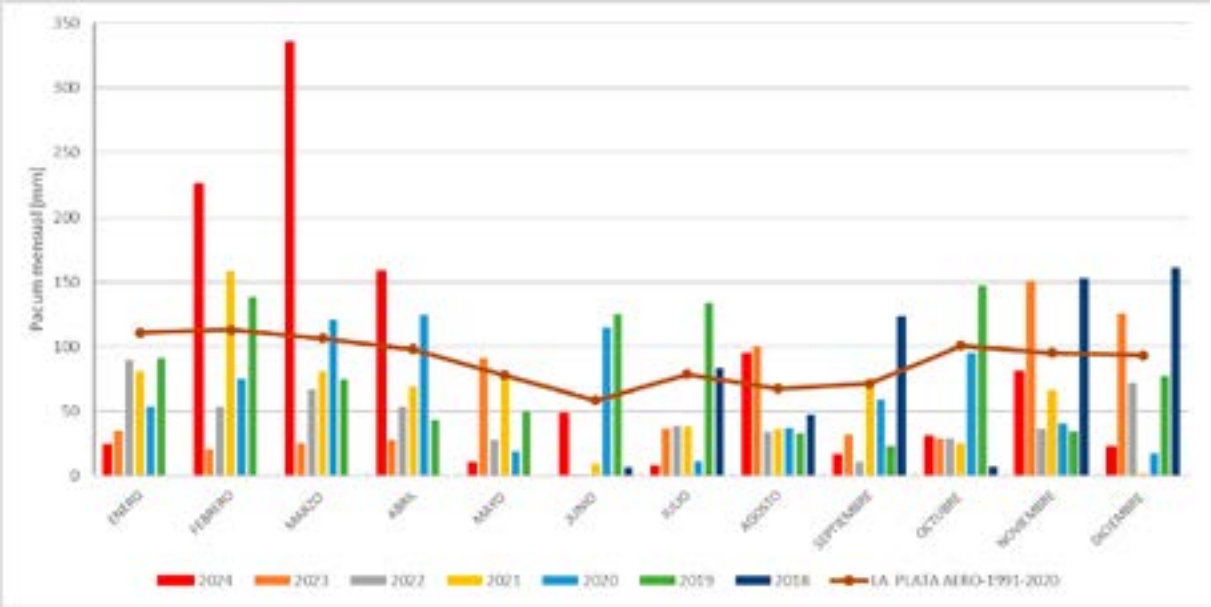


Figura 4 – Precipitaciones acumuladas mensuales (2018-2024) comparadas con estación La Plata Aero

Se han registrados precipitaciones de variadas intensidades, entre ellas podemos destacar el evento ocurrido el 10 del mes de NOV de 2018, donde se registrito una intensidad de 69.6 (mm/h) a las 13:45hs e intensidades de hasta 92 (mm/h) a las18:30hs.
En la **Tabla *4*** podemos ver que el año que mayor precipitación acumulo es 2024 (1056mm), y el de menor acumulación es 2022 (515 mm) (en este análisis se descarta el año 2018 ya que no se cuenta con registros de los primeros 5 meses por la fecha de la instalación de la EMA).
En la **Figura *5*** se muestran las precipitaciones máximas mensuales y diarias registradas.

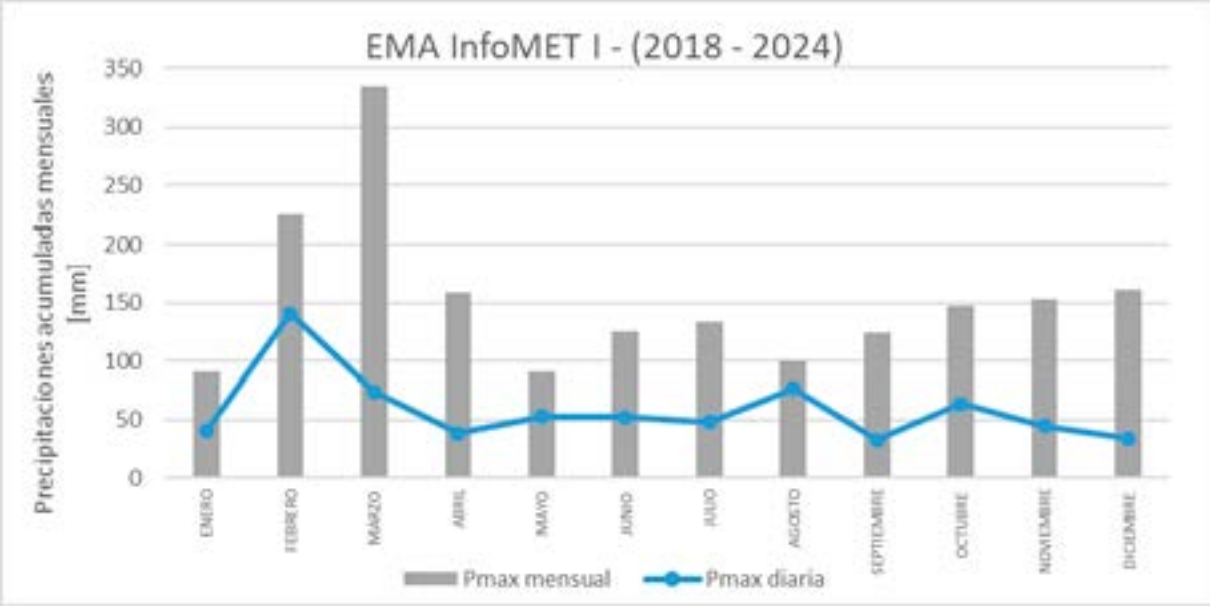


Figura 5 – Precipitaciones acumuladas máximas mensuales y diarias (2018-2024)

Mayor detalle y análisis de un evento en particular evaluado con la EMA InfoMET I y contrastado con estaciones cercanas, se presentan en el trabajo publicado juntamente con el presente en las mismas Jornada de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza, titulado "**Monitoreo Hidrometeorológico: Análisis de eventos registrados en estaciones meteorológicas de la región La Plata, Berisso y Ensenada**"

Resumen

En la **Figura *6*** se muestra un resumen mensual de las variables precipitaciones promedio mensuales, humedades relativas promedios, y temperaturas máximas, promedio y mínimas, mensuales.

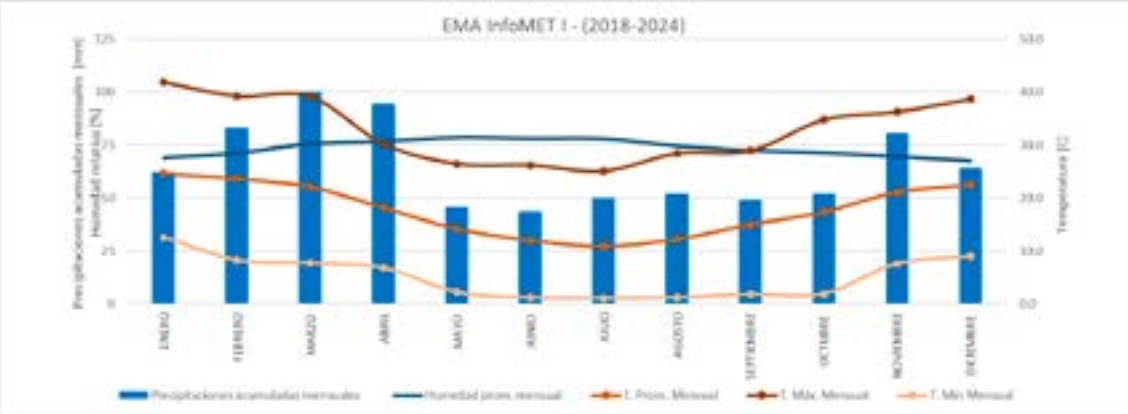


Figura 6 – Resumen tendencias mensuales de temperatura, precipitaciones y humedad relativa promedios (2018-2024)

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA

El monitoreo hidrometeorológico es una herramienta fundamental para comprender la dinámica del clima y su impacto en el entorno. A lo largo de los primeros años de operación de la Estación Meteorológica Automática InfoMET I, se han registrado datos que permiten identificar patrones climáticos, validar registros con otras estaciones de referencia y mejorar la confiabilidad de la información meteorológica disponible para la región.

Los resultados obtenidos han demostrado la consistencia de los datos de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica con los registros de estaciones oficiales como el Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (I.N.T.A.) y la Estación Meteorológica Automática La Plata Observatorio. Además, se han evidenciado tendencias que confirman el comportamiento característico de estaciones urbanas en relación con las temperaturas mínimas invernales.

En cuanto a la precipitación, se han identificado eventos de gran intensidad y acumulados que reflejan la variabilidad climática de la región.

Uno de los objetivos es estudiar registros de estaciones informales, localizadas en ambientes urbanos, “incorrectamente” emplazadas, porque resulta necesario identificar los patrones de sesgo respecto de las escasas estaciones formales existentes. En ese sentido este trabajo pretende caracterizar preliminarmente (seis años) el "régimen meteorológico” del ambiente urbano de la terraza del Departamento de Hidráulica, en este caso, como un requerimiento necesario para poder comparar con datos formales y poder validar su comportamiento sesgado.

Se presentaron los resultados del diagnóstico preliminar sobre las tendencias detectadas en la medición, su manejo y operatividad.

La recopilación y análisis de datos son la base para la planificación, mitigación de riesgos y la toma de decisiones informadas, fortaleciendo la resiliencia ante fenómenos extremos y promoviendo un desarrollo sostenible del entorno. Es por ello por lo que se destaca la importancia de contar con conocimiento hidrometereológico del entorno y por ende su constante monitoreo.

[Ref.1] Jornadas ITE, (2019).**"Análisis de eventos registrados en estaciones meteorológicas"** y “**Evaluación de la representatividad espacial de las estaciones”** UIDET Hidrología. Fernández, G., Garat, F., García, A. Espil Nosa, F. y Bianchi G.

[Ref.2] Jornadas ITE, (2021). “**Análisis de estaciones de La Plata en forma no presencial**” y “**Propuesta de mejora de la red pluviométrica de La Plata**”. UIDET Hidrología. Andrade Macias Foti, P; Caruso, I. S.; Andrada Frau, F; Espil Nosa, F; Garat, F. I.; y Bianchi, G. J.

APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DEL RÍO SANTA CRUZ, ARGENTINA: MODELO DE SIMULACIÓN DE LLENADO DE LOS EMBALSES

Vath, Brenda; Koerner, Manuel; Liscia, Sergio

UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, U niversidad Nacional de La Plata

Calle 47 Nº 200, La Plata (CP1900), Argentina - brenda.vath@gmail.com

Introducción

El río Santa Cruz, ubicado en la Patagonia Argentina, nace en el extremo oriental del Lago Argentino y cruza la provincia de Santa Cruz de Oeste a Este, para desembocar en el Océano Atlántico. En las progresivas 253 y 187 del mismo se encuentran en construcción las dos presas que integran los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz: Presidente Néstor Kirchner (NK) y Gobernador Jorge Cépernic (JC). En la Figura 1 puede observarse la ubicación de las obras.



Figura 1: Vista en planta de los Aprovechamientos Hidroeléctricos del río Santa Cruz.

Finalizada la construcción principal de la obra, la siguiente etapa consiste en la maniobra de cierre del desvío del río e inicio del llenado de embalse. Esta maniobra es un hito en las obras de represas, ya que se realiza por única vez y es la que habilita el cambio de obra de control hidráulico; en este proceso el agua pasa, de forma gradual y controlada, de escurrir por la obra de desvío a ser descargada a través de órganos controlados por compuertas o válvulas. En JC, el desvío del río se realizará mediante una estructura de control que contempla 5 vanos de 12 m de ancho cada uno. Los vanos impares se emplearán durante el desvío y serán posteriormente obturados, mientras que cada uno de los vanos pares cuenta con 2 descargadores de fondo de 3 m de ancho y 4 m de alto. En NK, el desvío del río se efectuará a través de conductos que posteriormente serán obturados. Durante el llenado se emplearán los 4 descargadores de fondo, de 4 m de alto y 3 m de ancho cada uno, y los 4 descargadores de medio fondo, de 4 m de ancho por 5 m de alto. Tanto en JC como en NK, las estructuras de control estarán provistas de compuertas que permitirán una erogación controlada durante la etapa de llenado.

La capacidad de controlar el caudal que se eroga, manteniéndolo con magnitudes inferiores al caudal que circula por el río, es lo que permite llenar el embalse. Al mismo tiempo, la

retención de agua en el embalse reduce el caudal que escurriría normalmente por el curso aguas abajo de las obras, impactando sobre el ecosistema fluvial. La atenuación del impacto ambiental de la etapa de llenado es una de las variables que definirán las características del proceso de llenado de los embalses.

Además de la modificación temporal en la hidrología del sistema, el llenado del embalse genera solicitaciones dinámicas a las estructuras, fundaciones y al entorno, dadas por la carga del agua acumulada y por el proceso de saturación (que reduce el peso efectivo de las partículas sumergidas). Estas solicitaciones crecen a medida que aumenta el nivel de agua. Por ello, aparecen condicionantes relacionadas con la seguridad de las presas y las laderas que imponen límites a la velocidad de llenado de los embalses. Además, para verificar que las solicitaciones estén dentro de los límites definidos en el proyecto, se realiza la auscultación de la presa y las laderas durante el llenado. Es recomendable detener el incremento en las solicitaciones por el tiempo necesario para que las lecturas de los instrumentos de auscultación se estabilicen y verificar que es seguro continuar con el llenado. La detención del llenado implica que debe erogarse el caudal que ingrese al embalse en todo instante de tiempo, lo que requiere verificar la capacidad de descarga de los órganos de control para este fin.

Adicionalmente, los caudales que escurran por el río cuando se de inicio a la maniobra de cierre del desvío y durante el llenado sólo se conocerán exactamente mientras ocurran estos eventos.

Debido a las condicionantes e incertidumbres mencionadas anteriormente, el llenado de los embalses debe proyectarse bajo diversos escenarios. En el presenta trabajo, se propone modelar una serie de escenarios de llenado de los embalses de JC y NK, variando las fechas de inicio y teniendo en cuenta las condicionantes correspondientes a cada período. Los resultados de estas simulaciones permitirán analizar cómo las fechas de inicio influyen en la duración y velocidad del llenado, así como evaluar la exigencia de cada escenario sobre el sistema hídrico aguas abajo de las presas. En función de estas variables, se determinarán las fechas de inicio de llenado más convenientes.

Metodología

Para simular el llenado de los embalses de JC y NK se desarrolló un modelo numérico que consiste en un reservorio al cual ingresan los caudales que circulan por el río Santa Cruz y del cual egresan los caudales erogados por los descargadores de fondo. Las condiciones iniciales del modelo, la magnitud del hidrograma que ingrese a los embalses y los caudales requeridos aguas abajo están definidos por el tiempo de inicio de la maniobra de cierre del desvío, mientras que la evolución de las variables de interés (niveles, caudales y salto) en el tiempo se calcula resolviendo la ecuación de continuidad. Cada escenario de llenado a evaluar tiene consignas previamente definidas, que incluyen:

- Serie de caudales del río (*Q50%*), que constituye el dato de caudales ingresantes al embalse. En este trabajo, y como es usual, se considera la serie de caudales medios, calculada a partir del caudal diario con 50% de probabilidades de superación en los registros históricos del río (Figura 1).
- Serie de caudales salientes mínimos del embalse: el hidrograma de salida es el denominado *QH1* (Figura 1), que es una combinación entre el año hidrológico de menores caudales de la serie histórica, año 1955-1956, de noviembre a enero, y los caudales correspondientes al percentil 95% de febrero a octubre. A su vez, se establece

que no debe alterarse el régimen hidrológico del río durante el período de invernada del macá tobiano[1] en el estuario del río Santa Cruz, durante los meses de junio y julio.

- Leyes de descarga de cada órgano de control (*QDFmáx*): los órganos de control considerados para el llenado de los embalses de JC y NK son los descargadores de fondo y medio fondo. Éstos cuentan con una ley que relaciona el caudal máximo de descarga con el nivel de embalse, pudiendo evacuar un caudal menor modificando el área de descarga. Por tal motivo, siempre debe verificarse que el caudal saliente de los embalses no supere a la capacidad máxima de los órganos de control.
- Ley de nivel-volumen de los embalses, que permiten relacionar el volumen almacenado en el embalse *V(t)* con el nivel alcanzado por el mismo *Ne(t)*.
- Definición de la velocidad máxima de llenado de los embalses. Para los embalses de JC y NK, se admite una velocidad máxima de llenado de 1 m/día, exceptuando los primeros metros de llenado, donde se admite una velocidad superior hasta que los descargadores de fondo adquieran capacidad suficiente.
- Definición de cantidad, nivel y duración de las paradas de seguridad. Para el llenado del embalse de JC se realiza una única detención entre las cotas 95 mIGN, que representa aproximadamente el 50% de la carga sobre la presa, y 106 mIGN, que es aproximadamente el 75% de la altura, equivalente a la mitad del total del empuje hidrostático. La cota 106 mIGN también es el nivel que da lugar al salto mínimo extraordinario de 26.5 m, a partir del cual las turbinas están habilitadas para operaciones de corta duración. Para NK se prevén dos paradas de seguridad: la primera, en el rango de cotas 143.5 mIGN – 154 mIGN, y la segunda, en cota 160 mIGN. Todas las paradas de seguridad tendrán una duración mínima de 14 días.
- Ley nivel-caudal de restitución del río, que permite determinar el nivel del río en la sección inmediatamente aguas abajo de la central, en función del caudal restituido al cauce. Esta relación no es necesaria a la hora de desarrollar el modelo de simulación de embalse, pero es crucial en el cálculo del salto útil de las turbinas.

En los escenarios evaluados, se incluye la hipótesis de funcionamiento de JC sin NK, debido al desfasaje en los cronogramas de construcción de ambas obras. También se considera que se dispone del volumen de regulación del embalse de JC para la erogación del caudal ecológico aguas abajo de NK durante su llenado.

Resultados y discusión

Los resultados que se obtienen del modelo de simulación para cada escenario de llenado son: el hidrograma de salida aguas abajo (*Qs*), la variación del nivel y el salto útil (*Hu*) en el tiempo.

La Figura 2 muestra los resultados que arroja el modelo de simulación de llenado del embalse de JC, considerando que la maniobra de cierre del desvío se inicia el día 1 de noviembre del año 2027. En este escenario, y respetando las condicionantes descriptas anteriormente, se alcanza el nivel máximo normal de operación del embalse de JC en 124 días.

Durante el llenado, se observa que el caudal erogado aguas abajo de JC (*Qs*) coincide, la mayor parte del tiempo, con el caudal ecológico (*QH1*), lo que permite acelerar el proceso de llenado manteniendo el caudal saliente en los valores mínimos requeridos. Sin embargo, se presentan dos situaciones en la que esto no se cumple: durante la parada de seguridad, cuando debe erogarse todo el caudal que ingresa al embalse para que el nivel del mismo se mantenga constante en el tiempo, y durante el inicio del llenado, cuando el nivel en el embalse no es suficiente para que los descargadores de fondo sean capaces de erogar el caudal ecológico. En esta etapa, el caudal saliente del embalse está limitado por la capacidad máxima de descarga de los órganos de control (*QDFmáx*) y, como resultado, la velocidad máxima de

[1] El macá tobiano es un ave endémica de Argentina. Se considera en peligro crítico de extinción (CR) por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

llenado se supera durante algunos días, hasta que los descargadores de fondo adquieren capacidad suficiente. La velocidad máxima de llenado no es condicionante para la descarga de los órganos de control en ningún momento durante el llenado.

La curva que representa la capacidad máxima de descarga de los órganos de control (QDFmáx) en la Figura 2 se mantiene siempre por encima del hidrograma de caudales salientes del embalse, verificando la capacidad de erogación de los descargadores de fondo. Esto se cumple incluso durante la parada de seguridad, cuando el caudal saliente del embalse debe igualar al entrante, permitiendo detener el llenado para realizar las tareas de auscultación. Sin embargo, esta operación requiere regular el área de descarga mediante el accionamiento de las compuertas, de forma tal que el caudal descargado sea el mínimo necesario para cumplir con la consigna ambiental.

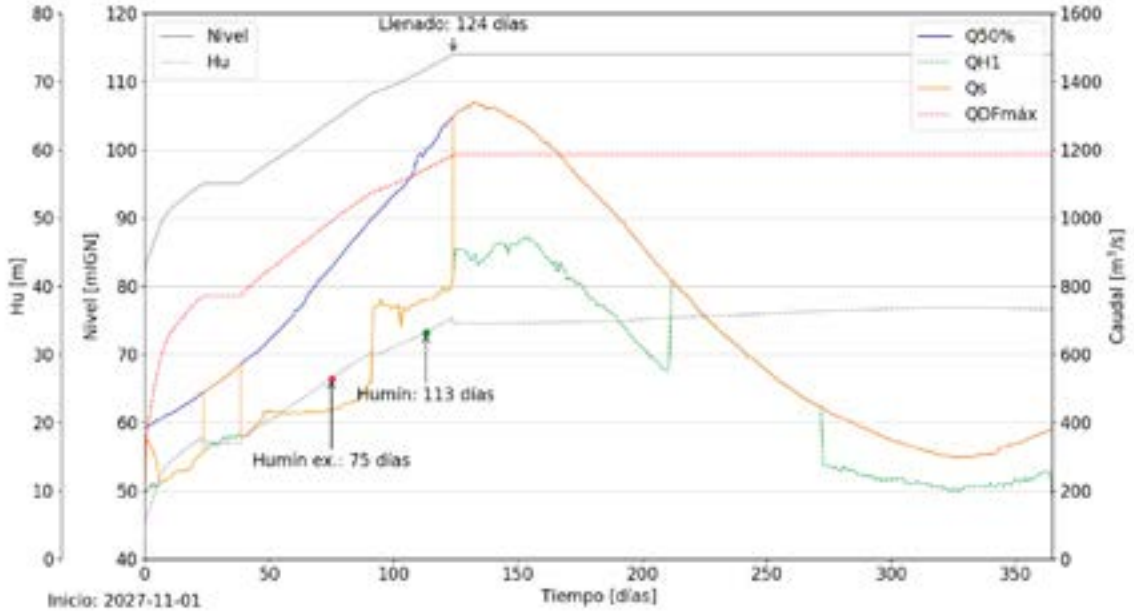


Figura 2: Llenado del embalse de la represa JC iniciando la maniobra el día 1/11/2027.

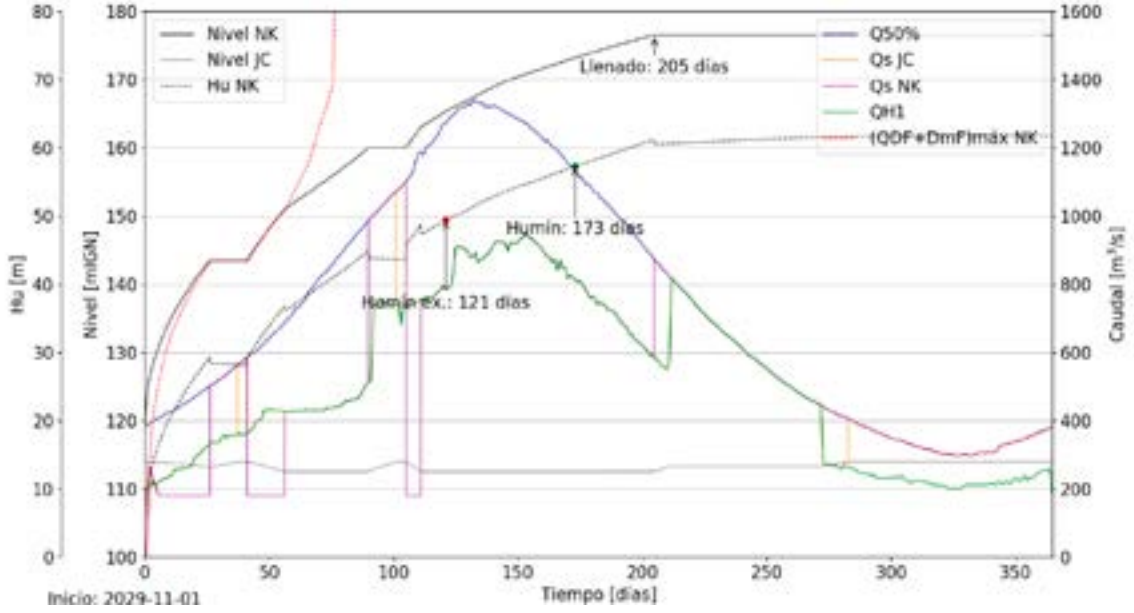


Figura 3: Llenado del embalse de la represa NK iniciando la maniobra el día 1/11/2029.

En la Figura 2 también se representa la variación del salto útil (*Hu*) en el tiempo, indicándose, con un punto rojo, el momento en el que se alcanza el salto útil mínimo extraordinario y, con un punto verde, cuando el salto es igual al mínimo normal. Esta información es fundamental en la planificación de las pruebas de comisionamiento de las turbinas y en la puesta en marcha de las mismas.

La Figura 3 muestra los resultados que arroja el modelo de simulación de llenado del embalse de NK considerando que la maniobra de cierre del desvío se inicia el día 1 de noviembre del año 2029 y que se dispone del volumen de regulación de JC para erogar caudal aguas debajo de NK. En este escenario, el llenado del embalse de NK se completa en 205 días.

En este caso, el hidrograma de salida de JC (*Qs JC*) es el que garantiza el caudal ecológico (*QH1*) aguas abajo de los aprovechamientos, lo que contribuye a reducir el tiempo de llenado de NK. En el tramo de río comprendido entre ambas represas, se permite descargar un caudal constante menor al ecológico de 180 m^3/s, que se corresponde con el caudal medio diario mínimo histórico del río Santa Cruz. Durante las paradas de seguridad, los órganos de control de NK descargan la totalidad del caudal que ingresa al embalse, lo que detiene el llenado de NK y permite recargar el volumen operativo de JC.

Al igual que en JC, durante los primeros días de llenado, la velocidad máxima es superada debido a la capacidad insuficiente de los órganos de control. Sólo durante este período el caudal saliente de NK (*Qs NK*) es igual a la capacidad máxima de descarga de los órganos de control (*(QDF + DmF)máx NK*). Durante el resto del período de llenado, se verifica que la capacidad máxima de los de los descargadores de fondo y medio fondo supera al caudal requerido aguas abajo de NK, incluso durante las paradas de seguridad.

Adicionalmente, en la Figura 3 se grafica la variación del salto útil (*Hu NK*) en el tiempo, indicando los momentos en los que se alcanzan los valores que permiten poner a prueba y comenzar a operar las turbinas.

La Figura 4 resume los tiempos en los que se alcanzan las cotas características de cada embalse, variando las fechas de inicio de llenado y teniendo en cuenta las condicionantes correspondientes a cada período. Esta figura indica, con una barra para cada fecha de inicio de llenado, los días necesarios para que el nivel de los embalses alcance las cotas del Nivel mínimo Extraordinario (*NmE*), Nivel mínimo Normal (NmN) y Nivel máximo Normal (NMN). Los resultados evidencian que el momento hidrológico más favorable para comenzar el llenado de los embalses coincide con el período de caudales crecientes en el río.

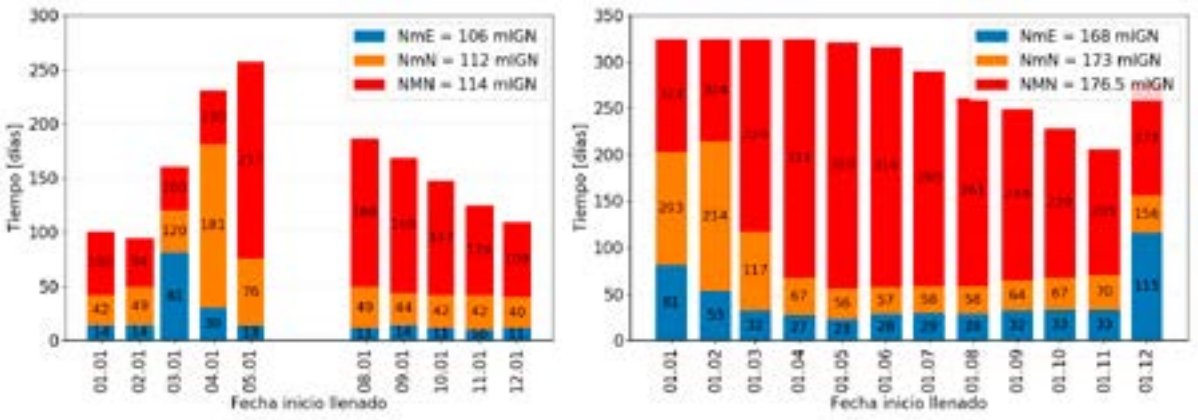


Figura 4: Tiempo requerido para que el nivel de embalse alcance cotas significativas según la fecha de inicio del llenado: JC (izquierda); NK (derecha). En el caso del embalse JC, no se incluyen los escenarios de llenado que inician en junio y julio para preservar el régimen hidrológico en el estuario del río Santa Cruz durante el período de invernada del macá tobiano.

Conclusiones

La definición del inicio de la etapa de llenado requiere el consenso entre intereses técnicos, ambientales y económicos, que a menudo se contraponen. Desde el punto de vista ecológico-ambiental, es deseable erogar caudales próximos al natural para minimizar las afectaciones en el sistema aguas debajo de los embalses, lo que resulta en un tiempo extenso de llenado. Por el contrario, los interesados en explotar los beneficios energéticos, de provisión de agua y económicos de las obras, desean que las mismas ingresen lo más pronto posible en operación. Finalmente, aspectos técnicos relacionados con la seguridad de presas y taludes, la complejidad de la ejecución de obras hídricas de gran magnitud, e incluso la imprevisibilidad del ciclo hidrológico, convierten la definición de la fecha del inicio del llenado en una decisión compleja.

El modelo de simulación desarrollado para este trabajo demostró ser una herramienta útil para analizar las interacciones entre estos aspectos y evaluar distintos escenarios de llenado. Los resultados mostraron que, para el escenario hidrológico seleccionado, las fechas de inicio más favorables coinciden con períodos de caudales crecientes en el río Santa Cruz, lo que optimiza la duración del llenado, manteniendo un control adecuado de las solicitaciones dinámicas sobre las estructuras y taludes, minimizando el impacto ambiental aguas abajo.

La capacidad de los órganos de control, específicamente los descargadores de fondo y medio fondo, se confirmó como un factor fundamental para garantizar un llenado seguro y eficiente. Las simulaciones verificaron que su capacidad es suficiente para erogar los caudales requeridos incluso durante las paradas de seguridad. Se demostró además la importancia de la regulación del área de descarga de los órganos de control mediante el accionamiento de las compuertas, que permite ajustar el caudal erogado al mínimo necesario para cumplir con las consignas ambientales.

La incorporación de criterios ambientales específicos, como la preservación del régimen hidrológico durante el período de invernada del macá tobiano en el estuario del río Santa Cruz, refuerza el concepto de que los aspectos ambientales deben estar integrados en la planificación de grandes obras hidráulicas. Asimismo, se resalta la necesidad de planificar detenciones del llenado para auscultar estructuras y taludes, garantizando la seguridad del proceso.

Finalmente, se resalta la flexibilidad que brinda la integración del volumen de regulación de JC como soporte durante el llenado de NK. Este recurso mejora la eficiencia del proceso sin comprometer las consignas ambientales.

Bibliografía

Lara, A. (2016) Evaluación de la influencia del Proyecto Hidroeléctrico Néstor Kirchner sobre los niveles de agua del Lago Argentino. Subsecretaría de Energía Hidroeléctrica de la Nación.

Liscia, S. O., Cacik, P., de Dios, M., Vath, B. (2023) Crecidas de diseño del río Santa Cruz. Universidad Nacional de La Plata.

Liscia, S. O., del Blanco, M. M., Galíndez, J. M. (2023) Simulación de operación de embalse y despacho de potencia y energía del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz. Universidad Nacional de La Plata.

ANÁLISIS TEMPORAL DE USOS DE SUELO EN LA CUENCA DEL ARROYO EL PESCADO

Joaquín Acha, Enrique Angheben, Esteban Lacunza y Paula Consoli Lizzi

UIDET Hidromecánica y UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 47 N° 200
joacoachauv@gmail.com

Introducción

La cuenca del arroyo El Pescado, situada entre La Plata y Magdalena, es un paisaje protegido con baja intervención antrópica. El presente trabajo amplía un estudio previo sobre su delimitación y morfología [1], con un análisis del uso del suelo a partir de imágenes satelitales de los años 2000, 2016 y 2023, capturadas en distintas estaciones.

El análisis del uso del suelo es relevante para comprender la interacción entre las actividades humanas y el entorno natural, con el fin de orientar estrategias de planificación sostenible. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución y técnicas de clasificación geoespacial en SNAP, lo que permitió identificar las principales coberturas: pastizales, arboleda, áreas agrícolas, zonas urbanas, invernáculos y cuerpos de agua.

Los resultados evidencian un aumento en la presión por la expansión urbana y agrícola, con posibles impactos en la calidad del agua y la biodiversidad. La aplicación de tecnologías espaciales facilita el monitoreo de estos cambios y la formulación de estrategias de gestión territorial. Este trabajo presenta una caracterización general de la cobertura terrestre en la cuenca en distintos momentos, lo que constituye un insumo para su planificación y conservación.

Parte experimental

Para realizar el análisis de los usos de suelo en la región de estudio, se aplicó un enfoque basado en imágenes satelitales y técnicas de clasificación supervisada. En primer lugar, se identificaron distintos tipos auxiliares a partir de sus firmas espectrales, que posteriormente se agruparon en categorías de uso del suelo. El software SNAP, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), proporciona herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes satelitales, lo que permite la generación de información geoespacial a partir de diversas fuentes. Para este estudio, se emplearon datos satelitales obtenidos a través de EarthExplorer (USGS) y Copernicus (Unión Europea), los cuales ofrecen acceso a imágenes de alta resolución y datos de radar de apertura sintética (SAR). La combinación de estas plataformas garantizó una mayor cobertura y diversidad de datos, lo que permitió el análisis de la región de estudio.

Las imágenes utilizadas corresponden a los satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea y Landsat 7 de la Nasa, seleccionados por su alta resolución espacial y temporal. El uso de imágenes de la misión Sentinel-2, con una resolución de 10 m y múltiples bandas espectrales, permitió una caracterización detallada de la cobertura terrestre y la vegetación. Por su parte, imágenes de la misión Landsat 7, con una resolución de 30 m y un amplio espectro de longitudes de onda, proporcionó una perspectiva complementaria para evaluar la evolución de los recursos a lo largo del tiempo, previo a la misión Sentinel-2.

Para analizar la evolución de los usos de suelo en el tiempo, se seleccionaron tres momentos del año con cambios significativos (otoño, invierno y primera) en tres años distintos (2000, 2016 y 2023). Las imágenes satelitales utilizadas fueron obtenidas de EarthExplorer (Landsat 7 para el año 2000) y Sentinel Hub de Copernicus ESA (Sentinel-2 para 2016 y 2023), con una nubosidad inferior al 10%.

Tras la descarga, las imágenes fueron recortadas para ajustarse al área de estudio mediante la geometría de la cuenca obtenida en QGIS. Luego, se realizó un remuestreo para garantizar compatibilidad entre imágenes, a partir de la banda B2 con resoluciones espaciales de 10 m

para imágenes Sentinel-2 y 30 m para imágenes Landsat 7 con banda b2. Posteriormente, se reproyectaron al sistema de coordenadas WGS 84 para estandarizar su proyección cartográfica.
Para la clasificación supervisada, se definieron áreas de entrenamiento con base en el conocimiento previo del terreno y en diagramas espectrales de reflectancia. Se establecieron áreas comunes para todas las imágenes, las cuales son: pastizal, arboleda, urbano, cultivo, sin cobertura (natural), áreas potencialmente afectadas por cultivos, baldíos e invernáculos. En algunos casos, se añadieron áreas específicas según la necesidad de mayor precisión en la clasificación. En Figura 1 se aprecian las firmas espectrales de los usos de suelo establecidos.

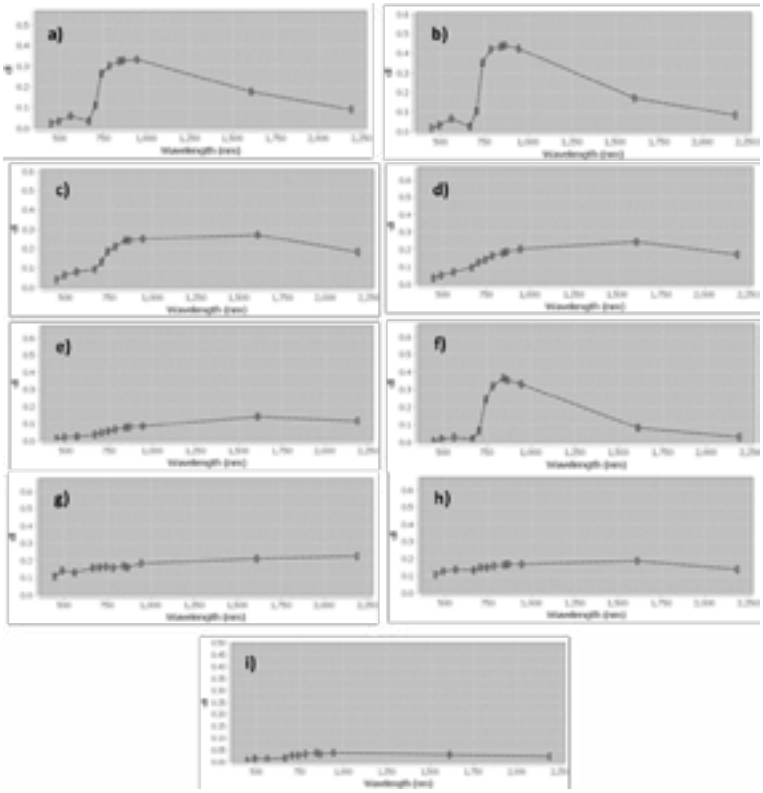


Figura 1: Firmas espectrales correspondientes a distintos tipos auxiliares de usos de suelo: a) Pastizal, b) Cultivo, c) Sin cobertura (natural), d) Áreas potencialmente afectadas a cultivo, e) Baldío, f) Arboleda, g) Urbano, h) Invernáculo, i) Agua

Con las áreas de entrenamiento definidas, se procedió a la clasificación de los usos de suelo mediante el método de Máxima Verosimilitud, una técnica de clasificación supervisada que asigna cada píxel a la clase con la mayor probabilidad de pertenencia, donde se asume una distribución normal de los valores espectrales. Este método permite obtener resultados precisos con un bajo costo computacional, lo que genera mapas coherentes con las firmas espectrales observadas y con mínimas áreas sin datos.
Para la clasificación, se utilizaron 20000 muestras de entrenamiento y se consideraron las bandas B1 a B8A para las imágenes de la misión Sentinel-2 y b1 a b7 para las imágenes de la misión Landsat 7. El análisis aplicado a la cuenca del arroyo El Pescado permitió identificar con precisión diversas coberturas del suelo, donde se incluyen las zonas urbanas, agrícolas, bosques, áreas naturales y cuerpos de agua.
En el análisis se identificó la necesidad de tomar decisiones respecto a la categorización de los usos del suelo, dado que algunos fueron agrupados en categorías más generales. Ante esta situación, se incorporaron categorías auxiliares, definidas como aquellos usos del suelo que no fueron clasificados como “principales” y cuya clasificación no sería utilizada posteriormente. Por ejemplo, las “áreas potencialmente afectadas a cultivo” (categoría

auxiliar) fueron integradas al uso principal “cultivo”, mientras que las clases “seco” y “sin cobertura” se incluyeron dentro de “pastizal”.
Cada imagen presentó una situación particular, en la que los usos del suelo definidos a partir de las áreas de entrenamiento no se mantuvieron uniformes en todos los casos. Estas diferencias respondieron a variaciones en la firma espectral de cada área específica. En algunos casos, por ejemplo, se identificaron múltiples categorías dentro de las “áreas potencialmente afectadas a cultivo”.
Para obtener los porcentajes relativos de cada uso del suelo, se utilizó el software QGIS en su versión 3.30.3, seleccionado por su capacidad para calcular áreas y generar porcentajes de manera eficiente. Se importaron los mapas ráster de las clasificaciones y se calcularon las áreas correspondientes a cada categoría de uso del suelo. Finalmente, la proporción de superficie ocupada por cada uso se obtuvo al calcular la relación entre cada una de estas áreas y el área total de la cuenca.

Resultados y Discusión
Como resultado del análisis realizado, se obtuvieron mapas de usos del suelo de la cuenca, en los cuales se distinguieron las categorías pastizal, cultivo, urbano, invernáculo y arboleda para nueve escenarios diferentes, correspondientes a los períodos de otoño, invierno y primavera de los años 2000, 2016 y 2023. En Figura 2 a Figura 4, se presentan algunos casos que han sido objeto de análisis, y que permiten evaluar los efectos del avance de la actividad antrópica los casos que han sido objeto de análisis.

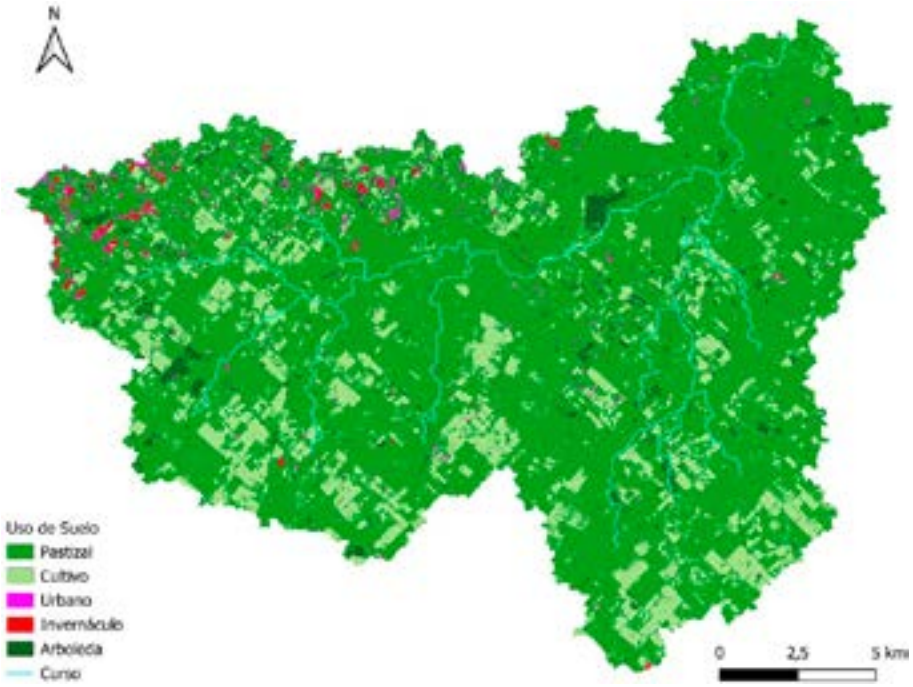


Figura 2: Mapa de usos de suelo. Año 2000

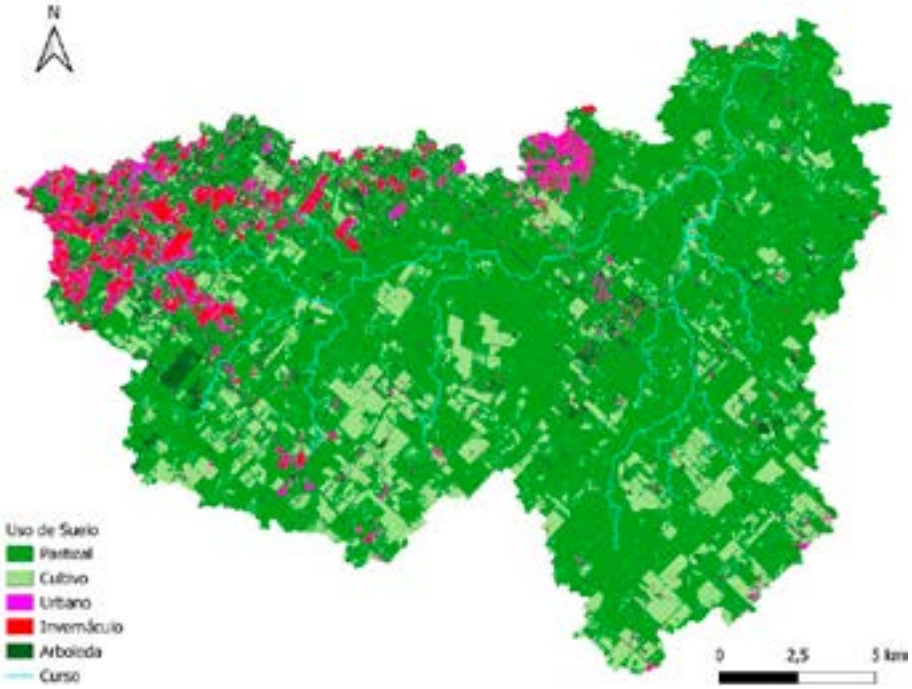


Figura 3: Mapa de usos de suelo. Año 2016

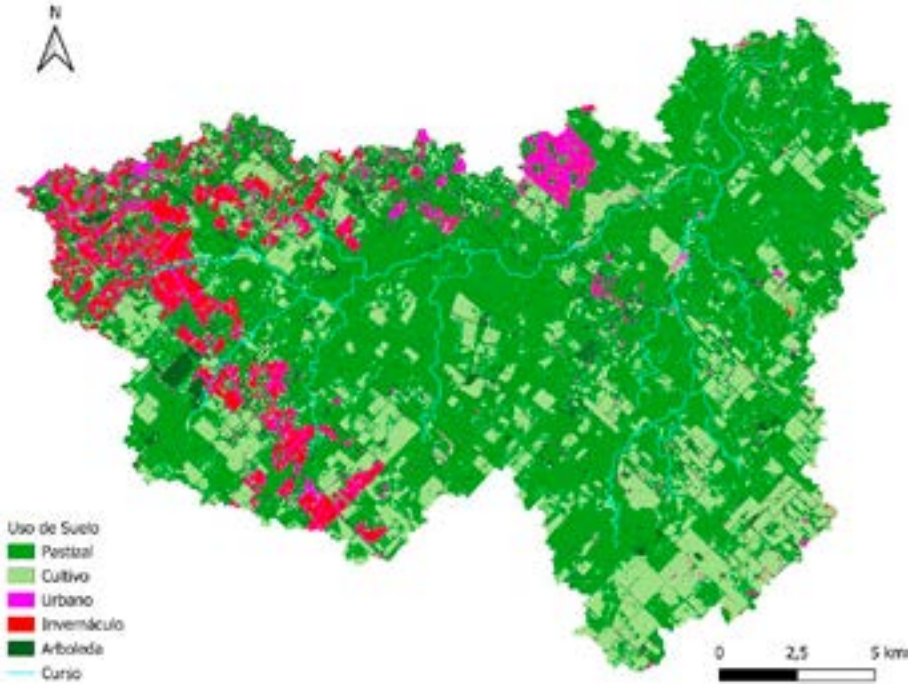


Figura 4: Mapa de usos de suelo. Año 2023

Los mapas de uso del suelo fueron sometidos a un proceso de postprocesamiento para generar el mapa de la Figura *5*, el cual representa el grado de impermeabilización registrado en la cuenca. Para ello, se analizaron las áreas urbanizadas y con invernaderos existentes en el año 2000, así como aquellas incorporadas en 2016 y 2023.

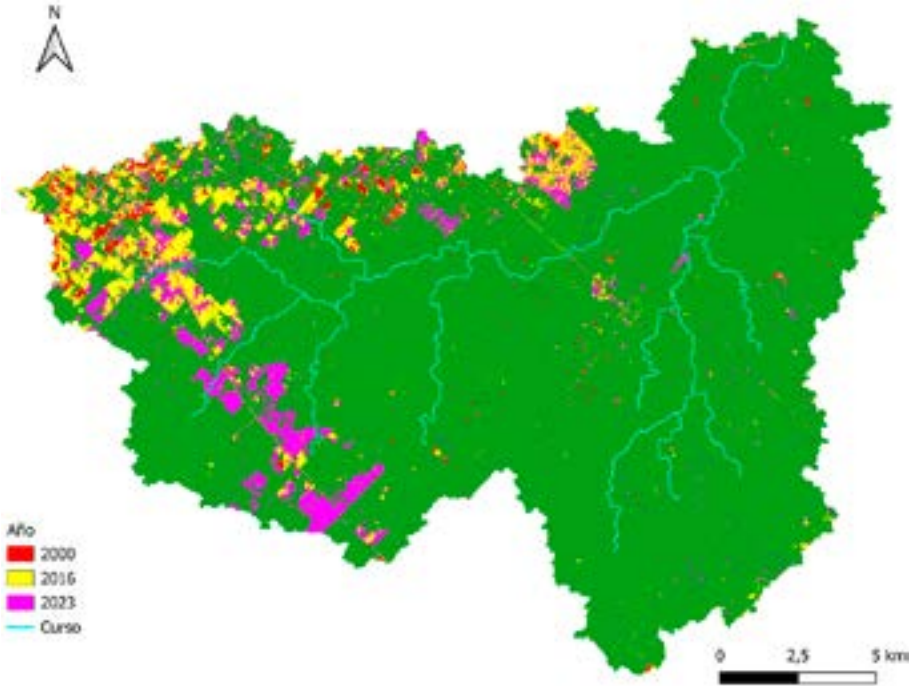


Figura 5: Avance de impermeabilización de la cuenca. Extensión ocupada por invernaderos y urbanizaciones en los años 2000 (rojo), 2016 (amarillo) y 2023 (magenta)

Los resultados indicaron que las áreas urbanas predominan en el norte y noroeste de la cuenca, mientras que las zonas agrícolas son más frecuentes en el oeste, con la presencia de invernáculos, y en el sur, con cultivos a cielo abierto. Los bosques y pastizales se distribuyen de manera más dispersa. Además, de caracterizar los usos del suelo, la clasificación permitió detectar cambios temporales, con una expansión urbana y la variabilidad estacional de las áreas agrícolas.
A manera de síntesis, en Tabla 1 se exhiben los promedios de los usos de suelo para cada año analizado.

Tabla 1: Promedio de porcentajes de usos de suelo para cada año

Usos	Porcentaje área (%)		
	Año 2000	Año 2016	Año 2023
Pastizal	74,63	68,19	63,51
Cultivo	21,16	21,63	23,74
Urbano	1,82	4,48	5,52
Invernáculo	0,62	2,86	4,02
Arboleda	1,77	2,84	3,20

Es necesario considerar que la delimitación de los usos de suelo basada en firmas espectrales pueda estar influenciada por la resolución espacial de las imágenes empleadas. En este sentido, el uso de imágenes de la misión Landsat 7, cuya resolución espacial es inferior a la de Sentinel-2, puede generar resultados de menor precisión. Sin embargo, para el año 2000, las imágenes Landsat 7 constituían una de las mejores opciones disponibles.
Asimismo, las firmas espectrales pueden variar entre imágenes, lo que puede derivar en ligeras diferencias en la clasificación de los usos de suelo.

Conclusión

El enfoque basado en imágenes satelitales y técnicas de clasificación supervisada permitió generar mapas de usos de suelo correspondientes a diferentes fechas. El análisis abarcó

distintas estaciones dentro de cada año para evaluar la evolución estacional del uso del suelo, así como múltiples años para identificar transformaciones a largo plazo en la cuenca.
A lo largo del período analizado, las actividades urbanas y la agricultura bajo techo han experimentado un crecimiento significativo. Este incremento se manifiesta entre el año 2000 y finales de 2023, período en el cual la urbanización y la expansión de invernaderos han aumentado en extensión, mientras que el pastizal natural ha sido el único uso del suelo en registrar una reducción en su porcentaje total. Por otro lado, la actividad agrícola a cielo abierto ha mantenido una estabilidad a lo largo del tiempo.
Los resultados obtenidos en este estudio constituyen una base inicial para futuros estudios, tales como aquellos orientados al establecimiento de rangos de coeficientes de Número de Curva (NC) con el objetivo de caracterizar las pérdidas del suelo.

Bibliografía

[1] J. Acha, P. Consoli, E. Angheben , E. Lacunza y A. Maistruarena, «Caracterización Morfológica de la Cuenca Arroyo El Pescado,» Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, 2024.

[2] European Space Agency, «SNAP Download,» Enero 2024. [En línea]. Disponible en: https://step.esa.int/main/download/snap-download/.

[3] United States Geological Survey, «EarthExplorer,» Enero 2024. [En línea]. Disponible en: https://earthexplorer.usgs.gov/.

[4] European Space Agency, «Copernicus Hub,» Febrero 2024. [En línea]. Disponible en: https://dataspace.copernicus.eu/.

[5] C. Baldini, «Territorio en Movimiento: Las Transformaciones Territoriasles del Cinturón Hortícola Platense en los Últimos 30 Años.,» Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, 2020.

[6] N. Fernández, «Evaluación Hidrológica del Uso del Territorio en la Región de los Partidos de La Plata, Berisso y Ensenada Bajo los Efectos del Cambio Climático.,» Facultad de Ingiería - Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, 2022.

[7] A. A. Pérez Ballari, «¿De Paisaje Protegido a Parque Industrial? Conflictos Ambientales y Usos de Suelo. Arroyo El Pescado. Partido de La Plata. Argentina,» Departamento de Geografía/ Centro de Investigaciones Geográficas - IdIHCS. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, 2019.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DEL ARROYO EL PESCADO

Joaquín Acha, Paula Consoli Lizzi, Adelina Maistruarena, Esteban Lacunza y Enrique Angheben

UIDET Hidromecánica y UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 47 N° 200
joacoachauv@gmail.com

Introducción

El presente trabajo caracteriza la cuenca del arroyo El Pescado desde una perspectiva planialtimétrica y determina sus índices morfológicos clásicos mediante el análisis de datos de sensores remotos. La cuenca se ubica entre los partidos de La Plata y Magdalena, en la provincia de Buenos Aires (Figura *1*), con su curso principal originado en Lisandro Olmos y alimentado por los arroyos Difuntos y Cajaravilla. Para el estudio, se utilizaron modelos digitales de elevación del Instituto Geográfico Nacional, procesados en QGIS, lo que permitió la extracción y evaluación de sus características geomorfológicas.



Figura 1: Ubicación cuenca El Pescado con punto de cierre en RP N°11, obtenida a partir de MDE

Parte experimental

Para la delimitación y caracterización de la cuenca, se combinaron diferentes enfoques que integran tanto información cartográfica como modelos digitales de elevación (MDE). Se realizó un trazado basado en cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y se complementó con un análisis derivado de modelos de elevación. A continuación, se delimitó la cuenca, se generó información detallada sobre la topografía y la red hidrográfica, y finalmente se obtuvieron parámetros característicos de la cuenca.

Para la delimitación de la cuenca, se estableció el punto de cierre en el puente sobre la Ruta Provincial N°11. Esta ubicación, situada aguas arriba de la zona de bañados, fue seleccionada debido a la dificultad para definir elevaciones en dicha región y en concordancia con los objetivos del estudio, que se enfocan en la cuenca media y alta del arroyo El Pescado.

Trazado con base en cartas IGN

Para el trazado manual de la cuenca, se realizó inicialmente un delineado manual basado en las cartas topográficas del IGN, correspondientes a las áreas de Villa Elisa, La Plata, Punta Blanca, Estación Gómez, Ignacio Correas y Magdalena.

Cada carta topográfica fue georreferenciada de manera individual. La metodología consistió en la creación de un polígono que siguiera las elevaciones señaladas en las cartas del IGN, donde se estableció como punto de cierre la desembocadura en el Río de La Plata.

Trazado con base en modelos de elevaciones digitales
Los MDE proporcionan información sobre altitudes, pendientes y dimensiones del terreno. Se utilizó un MDE con resolución espacial de 30 metros, adecuado para el análisis topoaltimétrico. Se utilizaron los MDE correspondientes al partido de La Plata (*3557-13, 3557-14, 3557-19 y 3557-20*). A partir de estos datos, se generó un modelo único de elevaciones. Asimismo, el análisis se realizó en el marco de referencia geodésico POSGAR 07, específicamente en la faja 6 (*EPSG 5348*).
Posteriormente, se eliminaron depresiones y se generaron mapas de flujo topográfico, así como mapas de acumulación y dirección de drenaje.
La delimitación obtenida a partir de los MDE constituyó la base para la obtención de los demás resultados del análisis.

Modelo de Elevaciones Filtrado
La resolución original del MDE incluye tanto la cobertura vegetal puntual como elementos de infraestructura, lo que puede generar sesgos en las elevaciones. Para mitigar este efecto, se aplicó un método de filtrado basado en la conversión del modelo ráster a una capa vectorial.
Se eliminaron los puntos correspondientes al 10% de las elevaciones más altas, y la capa resultante se transformó nuevamente a formato ráster, con interpolación de las áreas sin datos con una distancia máxima de 100 píxeles.

Curvas de nivel
El trazado de curvas de nivel facilita la comprensión de la topografía de la región. Se generaron curvas de nivel a partir de un MDE con resolución reducida de 60, 90 y 120 m. Se seleccionó el modelo con resolución de 120 m para este propósito. Para lograrlo, mediante la calculadora ráster, se promediaron filas y columnas según la resolución deseada. Posteriormente, se extrajeron las curvas de nivel y se aplicó el algoritmo Douglas-Peucker con una tolerancia de 150 m para simplificar las polilíneas, seguido de un proceso de suavizado.

Red hidrográfica
Se estableció un umbral de 7500 celdas de acumulación para definir un segmento como arroyo, y la red hidrográfica obtenida fue validada mediante comparación con imágenes satelitales y cartas topográficas del IGN. El análisis identificó tres arroyos principales con régimen permanente o semipermanente: El Pescado, Cajaravilla y Difuntos, así como dos ramificaciones, denominadas “Brazo Este Cajaravilla” y “Brazo Sur Pescado”, nomenclatura propuesta en este trabajo debido a la falta de distinción en mapas oficiales.

Delimitación de las subcuencas
Para la delimitación de las subcuencas, se utilizó la red hidrográfica obtenida y los mismos procedimientos empleados en la definición de la cuenca principal.
Para esto, se adoptó un enfoque combinado al integrar ambos modelos de elevaciones (filtrado y crudo) junto con cartas topográficas como referencia. Esta metodología permitió obtener una delimitación de subcuencas confiable.

Parámetros de la cuenca
Los parámetros morfométricos permiten caracterizar la configuración espacial de la cuenca y evaluar su influencia en los procesos hidrológicos. A partir del MDE y de la red hidrográfica, se calcularon indicadores como la densidad de drenaje, el factor de forma, la pendiente media de la cuenca y del cauce principal, los cuales inciden en la velocidad del escurrimiento y en la dinámica erosiva. Además, se determinó el coeficiente de compacidad de Gravelius, que compara la forma de la cuenca con la de un círculo de área equivalente y mide su grado de

regularidad [1], junto con otros indicadores como la longitud promedio del flujo superficial, la frecuencia de cursos y la razón de elongación.
Para complementar la caracterización de la cuenca, se generó su curva hipsométrica, la cual representa la distribución del área en función de la elevación y permite evaluar su estado geomorfológico.

Resultados y Discusión

La delimitación de la cuenca del arroyo El Pescado se abordó con dos metodologías: una basada en MDE y otra en cartas IGN. Ambos métodos mostraron alta correspondencia, con áreas de 330,3 km^2 y 356,3 km^2, respectivamente. El trazado manual con cartas IGN sirvió para validar el obtenido a partir del MDE y proporcionó información adicional sobre la cuenca baja como se aprecia en Figura *2*. La diferencia entre puntos de cierre se debió a que el trazado con MDE no permitió una adecuada delimitación en la zona de bañados y por eso se cerró en RP N°11, mientras que las cartas IGN incluyeron el área hasta la desembocadura del Río de La Plata. Las discrepancias en la cuenca media y alta se atribuyen a factores como alcantarillas, terraplenes y elevaciones no representadas en las cartas. Dado que el enfoque del estudio es la cuenca media y alta, se concluye que los resultados del trazado a partir del MDE fueron válidos.



Figura 2: Comparativa entre trazado de la cuenca en base a Cartas IGN y MDE

Además, se obtuvo un modelo de elevaciones con una adecuada correlación respecto a los valores consignados en las cartas del IGN, del cual se derivaron las curvas de nivel presentada en Figura *3* y la red hidrográfica de la cuenca presentada en Figura *4*.

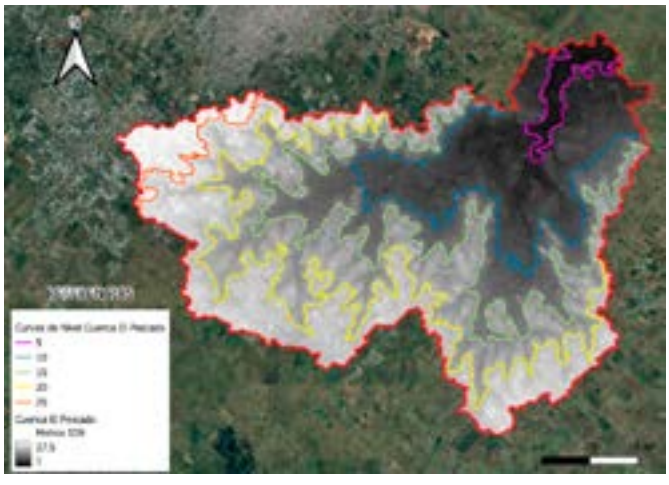


Figura 3: Modelo de elevaciones filtrado y sus curvas de nivel

La red de drenaje total de la cuenca presenta cinco cursos principales y alcanza una longitud de 103,7 km. Esto se resume en Tabla 1.

Tabla 1: Cursos principales y sus longitudes

Nombre	Longitud (km)
El Pescado	35,8
Cajaravilla	18,2
Difuntos	7,3
Brazo Este Cajaravilla	7,0
Brazo Sur Pescado	6,9
Total Red	**103,7**

Se aplicó el método de Horton, que ordena los cursos de agua según su grado de bifurcación. Se obtuvo una red de orden 3, con 10 cauces de primer orden, 2 de segundo orden y 1 de tercer orden. Se calcularon las relaciones de bifurcación (Rb), con valores de $Rb_1 = 5$ y $Rb_2 = 2$, lo cual resultó en la obtención de un valor total de $Rb_t = 3,01$, dentro del rango típico de 3 a 5 para cuencas sin influencia geológica significativa en el drenaje.
A partir de los resultados previamente obtenidos, se logró la división de la cuenca en tres subcuencas diferenciadas como se observa en Figura 4:

1. Subcuenca Alta: comprendida entre el nacimiento del arroyo El Pescado con la confluencia con el arroyo Difuntos, la cual tiene un área de 148,2 km^2.
2. Subcuenca Media: comprendida inmediatamente aguas abajo del arroyo Difuntos hasta la confluencia del arroyo El Pescado con el arroyo Cajaravilla, con un área de 150,5 km^2.
3. Subcuenca Baja: comprendida inmediatamente aguas abajo del arroyo Cajaravilla hasta el punto de cierre en RPN°11, con un área de 31,6 km^2.



Figura 4: Subcuencas y red hidrográfica

Parámetros de la cuenca
Los parámetros morfométricos ofrecen una descripción cuantitativa de la geometría de la cuenca, ya que proporcionan información para la estimación del escurrimiento superficial, la concentración de caudales y la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación. El análisis conjunto de estos parámetros permite comprender mejor la estructura hidrogeomorfológica de la cuenca y su impacto en la dinámica hidrológica, lo que constituye una herramienta para gestión del recurso hídrico y la planificación territorial.
En la Tabla *2* se presenta un resumen de los valores calculados, donde se observa que la cuenca posee una densidad de drenaje de 0,31 km/km^2, que indica una densidad de drenaje

que puede ser caracterizada como baja o deficiente en relación con el área evaluada; también puede apreciarse que el factor de forma es de 0,21 lo que sugiere que la cuenca tiene una forma alargada.

Tabla 2: Resumen de resultados característicos

CARACTERÍSTICAS	
Área (km^2)	330,3
Densidad de Drenaje (km/km^2)	0,31
Factor de Forma (-)	0,21
Pendiente media CP (m/m)	0,0006
Pendiente media cuenca (m/m)	0,006
Coeficiente de Gravelius (-)	2,22
Longitud flujo superficial (km)	0,8
Aspereza (-)	6,69
Frecuencia de cursos ($1/km^2$)	0,04
Razón de elongación (-)	0,57
Coeficiente de torrencialidad ($1/km^2$)	0,03
Relación de bifurcación total (-)	3,01

La curva hipsométrica obtenida se presenta en Figura 5, y proporciona información sobre la distribución altitudinal de la cuenca.

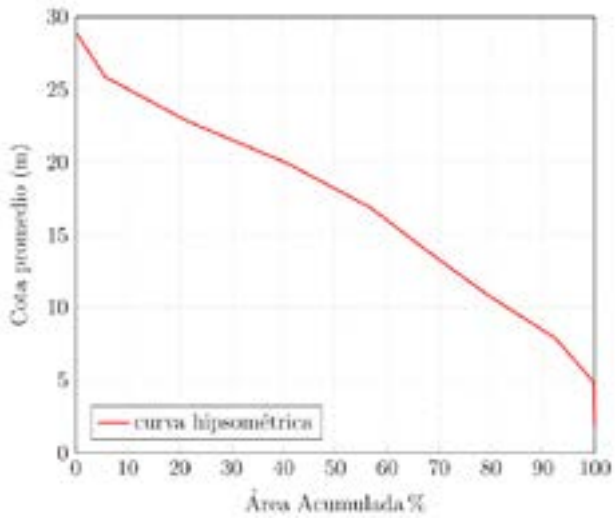


Figura 5: Curva hipsométrica

Para analizar la coherencia de los resultados, se compararon estos parámetros con los de la cuenca del río Luján [2], en el noroeste de Buenos Aires, debido a sus similitudes geomorfológicas y climáticas con la cuenca del arroyo El Pescado. Esta comparación permitió verificar la consistencia de los valores obtenidos.

Conclusión

Se delimitó la cuenca del arroyo El Pescado y se estimaron sus parámetros morfológicos a partir de los MDE del IGN de libre acceso, procesados en QGIS. La validez de los resultados se verificó con cartas topográficas e imágenes satelitales, lo que permitió generar un MDE

filtrado, curvas de nivel, la red hidrográfica y las subcuencas, productos que servirán de insumo para otros estudios.
Los parámetros geomorfológicos de la cuenca del arroyo El Pescado, caracterizada por bajas pendientes, forma estrecha y baja densidad de drenaje, indican un patrón de drenaje poco desarrollado. El coeficiente de Gravelius sugiere una morfología compleja, mientras que la baja torrencialidad y la reducida razón de elongación reflejan menor propensión a inundaciones. Estos resultados son importantes para comprender los procesos hidrológicos de la cuenca.

Bibliografía

[1] S. Fattorelli y P. C. Fernández, Diseño Hidrológico Segunda Edición, Edición Digital, 2011.

[2] P. Riva, A. Sánchez Caro y F. J. Gaspari, «Caracterización morfométrica de la cuenca del río Luján, Buenos Aires, Argentina,» *Geografía y Sistemas de Información Geográfica,* pp. 1-20, 2021.

[3] L. S. Nanía, LA CUENCA Y LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS, Granada: Universidad de Granada, 2003.

[4] Manual de Aprendizaje QGIS [En línea]. Disponible en: https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/training_manual/index.html. [Último acceso: Julio 2023].

[5] Instituto Geográfico Nacional [En línea]. Disponible en: https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Busqueda. [Último acceso: Julio 2023].

[6] F. J. Gaspari, A. M. Rodríguez Vagaría, G. E. Senisterra, M. I. Delgado y S. I. Besteiro, Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas, La Plata: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, 2013.

[7] A. Guitelman y A. Leiva, Hidrología e Hidráulica Vial. Capítulo 2. Guía de Conceptos de Hidrología, Buenos AIres: Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos AIres.

[8] J. B. Sciortino, Elementos de Hidrología, Salta: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Salta, 2019.

RELEVAMIENTOS EN CAMPO Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL ARROYO EL PESCADO

Paula Consoli Lizzi y Esteban Lacunza

UIDET Hidromecánica, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP.
Calle 47 N° 200
paula.consoli@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La cuenca del arroyo El Pescado, situada en la provincia de Buenos Aires, constituye un área de especial interés debido a su condición de paisaje protegido, donde la actividad antrópica se encuentra restringida. El objetivo del presente trabajo es exponer los primeros avances de la caracterización hidráulica y morfológica del cauce del arroyo El Pescado, que incluyó relevamientos en campo y estudios de imágenes satelitales de la cuenca media y baja. Las visitas a campo incluyeron relevamientos topobatimétricos, ejecución de aforos y monitoreo participativo del nivel del agua. Adicionando a estos datos el estudio de imágenes satelitales, se elaboraron estadísticos clásicos para la caracterización morfológica en planta del cauce.

PARTE EXPERIMENTAL

a. Relevamientos en campo

Se realizaron trabajos de campo en ocho sitios de la cuenca media y baja del arroyo, cuya ubicación se muestra en la Figura 1. Los relevamientos se efectuaron entre 2019 y 2025.



Figura 1. Sitio de trabajo. Izquierda: Localización general, el polígono indica sector detallado a la derecha. Derecha: Ubicación de sitios monitoreados en cuenca media y baja, acompañadas de cauces principales (verde) y vías de acceso (amarillo) para facilitar su interpretación.

Los sitios S12, S11, S14 y S15 fueron de especial interés. La locación S12 fue óptima para aforos debido a su cauce definido y estabilidad, aunque su acceso se ve limitado tras lluvias intensas. Tiene la ventaja adicional de encontrarse unas centenas de metros aguas abajo del ingreso del afluente Cajaravilla. S11, ubicado en Ignacio Correas, es fácilmente accesible y se ha instalado allí una escala para monitoreo de niveles, si bien no es apto para ejecutar aforos. S14 y S15, en la cuenca baja, presentan flujo retrocedente por efecto de marea creciente, siendo adecuados para evaluar dicho fenómeno. Los sitios S7, S9, S10 y S12B sobre el arroyo Cajaravilla comprenden alcantarillas sobre afluentes impermanentes que complementaron el estudio al ampliar la información sobre la red de drenaje.

Los relevamientos efectuados comprendieron aforos líquidos, monitoreo de nivel de pelo de agua, relevamientos topobatimétricos y observación expeditiva del pasaje de una onda de marea. La metodología de cada tarea se describe a continuación

- *Aforos líquidos*. Se realizaron en S12, en una sección vadeable delimitada con estacas permanentes. Se midió perfil batimétrico, perfil de velocidad media y cota de superficie libre respecto a un punto fijo local propio materializado sobre el puente. Se emplearon correntómetros electromagnéticos (OTT Nautilus C 2000) y de hélice (SIAP), empleando la metodología mean section [1]. Para algunos aforos se aplicó la técnica LSPIV (Velocimetría por Imágenes a Gran Escala) utilizando videos obtenidos con dron y celular. Se destaca la variabilidad en metodologías según las condiciones del cauce, incluyendo aforos en secciones más contraídas en caudales bajos.
- *Monitoreo de niveles de pelo de agua*. Se instaló una escala en S11 (Ignacio Correas) amurada a un puente ferroviario, con cero de escala en cota 4.37 m IGN. Se impulsó un relevamiento participativo donde la comunidad contribuyó con fotografías.
- *Relevamientos topográficos*. En cada sitio se pintó un punto fijo (PF) al que se refirieron las secciones trasversales relevadas con nivel y mira. Para obtener cotas IGN se realizaron mediciones GPS (South, RTK en modo fijo), postprocesadas con SOUTH Geomatic Office. Se validaron mediante contrastes con nivel y mira, medición de cotas GPS en distintas fechas y puntos IGN. Si bien las dos primeras metodologías mostraron resultados consistentes, al referir los relevamientos a cotas IGN se encontraron diferencias del orden de 13 cm.
  Se recorrieron tramos del cauce relevando múltiples secciones en inmediaciones de S11 y S12 con GPS. Se caracterizaron obras de arte en S7, S9 y S10 con cinta métrica, y desde el puente de S11 se midieron profundidades con soga y muerto.
- *Pasaje de una onda de marea*. Durante una visita a S14 en situación de marea creciente y con un intervalo de 4 horas se midió el nivel del agua con nivel y mira, y se estimaron velocidades de flujo con velocimetría por imágenes (PIV). Se utilizaron trazadores naturales como burbujas de espuma y restos vegetales en movimiento. Como referencia, se consultaron registros de niveles de los mareógrafos de Puerto La Plata y Magdalena.

b. Análisis de imágenes satelitales

El acceso a imágenes satelitales de alta resolución permitió el análisis de la morfología en planta del curso fluvial. En primer lugar, se empleó el software Google Earth Pro por su libre licencia, disponibilidad de imágenes tomadas en el último lustro, y capacidad de trazar rutas georreferenciadas. Mediante esta herramienta se trazó la línea central del cauce fluvial, dividiéndolo tres tramos: Desde RP36 hasta la confluencia de los brazos El Pescado y Cajaravilla (22.6km); desde la confluencia hasta cruce con RP11 (6.8km); y desde RP11 hasta la desembocadura en el Río de la Plata (8.6km).

Luego, el análisis estadístico morfológico se realizó mediante el software Meander Statistics Toolbox (MStat) [2], de libre acceso y licencia. Para su utilización es necesario el ingreso de la traza central del cauce fluvial y un valor característico del ancho del curso en el tramo bajo estudio. El módulo utilizado del programa realiza ajustes de funciones tipo spline, identifica puntos de inflexión y define las curvas del cauce a partir de dichos puntos. Luego, estima su sinuosidad, longitud de la curva, distancia entre puntos de inflexión, amplitud de la curva, entre otros.



Figura 2. Izq.: trazado de la línea central de un tramo del arroyo El Pescado. Der: procesamiento del tramo con el software MStat.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de velocidades

Las principales características de la sección de aforo en S12 son ancho superficial ~10 m, profundidad media ~0.4 m y velocidades del orden de 3 cm/s en el rango de caudales de 80-300 l/s. Es imprescindible mencionar que este rango de velocidades supone un desafío para efectuar mediciones, debido a que es indetectable para el molinete, y ha resultado en la imposibilidad de determinar caudales en varias visitas. En crecida (caudal de unos 6 m^3/s), relevamientos con dron indican velocidades superficiales de hasta 0.5 m/s y distribución asimétrica del flujo Adoptando el valor típico α=0.85 para la relación entre velocidad media y superficial, las velocidades medias alcanzan 0.44 m/s. La Figura 3 ilustra la distribución de velocidades en dos escenarios extremos relevados.

En condiciones de bajos caudales resulta posible acceder a una sección más encajonada situada aguas arriba del puente de S12, que presentó velocidades detectables para el equipamiento disponible (tirante de 0.45 m, ancho superficial de 4 m y velocidad media 0.14 m/s para caudal de 259 l/s).

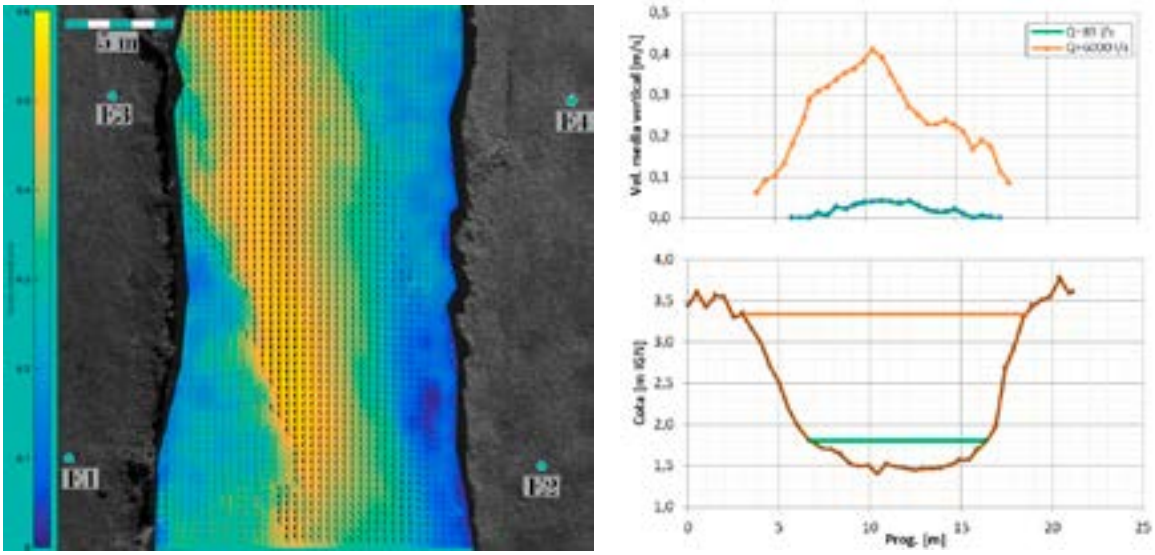


Figura 3. Distribución de velocidades en sitio S12. Izquierda: Distribución en planta de velocidades superficiales obtenidas mediante LSPIV durante una crecida de caudal 6000 l/s. Derecha: caracterización de la sección transversal (progresiva cero en margen izquierda)

para eventos de 89 l/s y 6000 l/s: perfil batimétrico y cota de pelo de agua en la parte inferior, y perfil de velocidad media vertical en la parte superior.

Aforos

Los aforos en S12 resultaron en el reporte de pares de valores de cota de pelo de agua y caudal, representados gráficamente en Figura 4. La tendencia general de los puntos azules sugiere un incremento de tirante con el caudal, aunque los datos son insuficientes para establecer una ley de la típica forma $Q=a\ h^b$ (donde Q es el caudal, h el tirante y a y b son constantes). Los puntos correspondientes a campañas de aforo con velocidades indetectables se representan en naranja, y son desestimados en virtud de que aportan incertidumbre al análisis. Se han incorporado algunas cotas de referencia para completar la interpretación: el lecho y desborde de la sección de aforo (ya representada en Figura 3), la cota de viga inferior del puente y el nivel de pelo de agua que un vecino reportó durante una crecida en marzo de 2024.

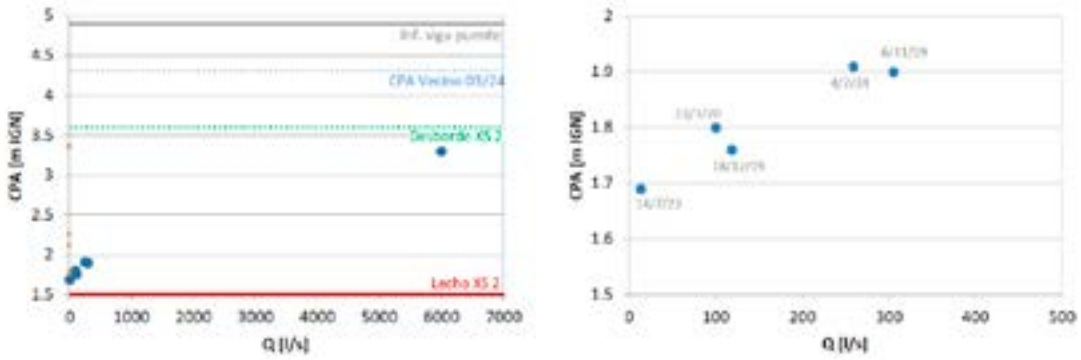


Figura 4. Ley H-Q en sitio S 12. Izquierda: rango de observaciones incluyendo valores de referencia. Derecha: detalle para bajos caudales, indicando fecha de medición.

Monitoreo de niveles

La lectura de escala en el puente ferroviario en S11 ha sido efectuada tanto por profesionales intervinientes como a través de la invitación a los vecinos para participar en el proyecto de ciencia ciudadana.

En Figura 5 se grafican las lecturas de escala registradas. En general los niveles se encuentran por debajo del cero de escala, salvo tras períodos de lluvia intensa.

La sección S11 se encuentra unos 6.5 km aguas arriba de S12. Considerando que con fecha 4/07/24 se midieron cotas de pelo de agua de 4.05 m IGN y 1.92 m IGN respectivamente, la pendiente media de la superficie libre entre ambos sitios resultó 0.33 ‰.

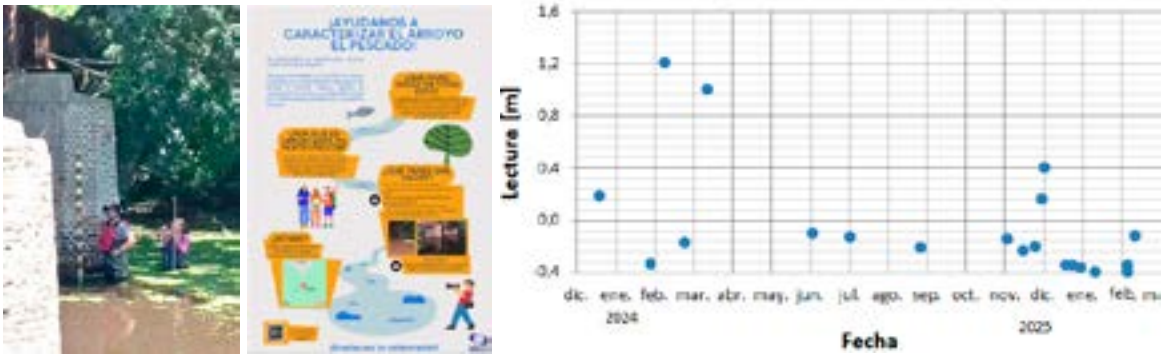


Figura 5. Monitoreo de niveles en S14. Instalación de la escala, póster de ciencia ciudadana y registro de datos.

Topobatimetría

Se relevó en detalle el tramo de arroyo comprendido entre S12B y S12, obteniendo con GPS 14 secciones transversales en una distancia de 500 m. Para un caudal Q~259 l/s, las secciones ubicadas aguas arriba del puente de S12 mostraron ancho promedio de 5 m y profundidad máxima de 0.6 m. Por otra parte, la batimetría de la sección de aforo habitual en S12, analizada en diversas fechas, mantiene su forma con leves variaciones (que podrían explicarse por vandalización del estacado). Los relevamientos ponen de manifiesto una diferencia en la morfología aguas arriba y aguas abajo del Puente de las Llamas.
En el sitio S11 el puente vial cuenta con vanos de 10.5 m, siendo un escenario habitual que el cauce presente allí 25 m de ancho y 0.8 m de profundidad en aguas bajas. No se evidenciaron cambios en la batimetría entre 2022 y 2023. Además de dicha sección, se relevó en detalle un perfil transversal del cauce 60 m aguas arriba.
Se relevaron las alcantarillas en S07, S10 y S12B, que normalmente permanecen secas o desconectadas del resto del cauce y sólo transportan agua en eventos de lluvia intensa.
Estos datos serán un insumo de utilidad para plantear a futuro un modelo hidrodinámico.

Influencia de la marea
En S14 y S15 se observa flujo retrocedente en ciertas condiciones de marea. En la visita del 19/07/24 a S14, se registró una diferencia de niveles de 26 cm en poco más de 4 horas durante la marea creciente, mientras que en el río de La Plata la variación fue de 0.9 m. Aunque debe revisarse la cota de punto fijo, se estima que en reflujo el nivel del arroyo en S14 era 0.65 m inferior al de la desembocadura. Se midieron velocidades de hasta 0.8 m/s bajo el puente en flujo y 0.4 m/s en reflujo.

Estadísticos morfológicos

Los tramos entre RP36 y RP11, han arrojado resultados muy similares, presentando valores medios de sinuosidad de 1.056 y 1.052 respectivamente. Por su parte, el tramo entre RP11 y la desembocadura presenta una sinuosidad de 1.13, marcando un leve aumento respecto a los anteriores. Las curvas del arroyo en el tramo RP36-RP11 presentaron, en promedio, longitudes de cuerda de 147.5m mientras que el tramo inferior del río la longitud promedio fue de 150m. Finalmente, el análisis marcó una leve tendencia de las curvas a aproximar su punto de mayor curvatura al punto de inflexión aguas debajo de la misma.

CONCLUSIONES
Se han obtenido datos preliminares de niveles, caudales y morfología del cauce del arroyo El Pescado en la cuenca media y baja.
El sitio S12 reúne los aportes de El Pescado y Cajaravilla, y resulta adecuado para aforar. Se han realizado aforos exitosos por vadeo entre 100-300 l/s, mientras que la técnica LSPIV con dron es prometedora para altos caudales, como 6000 l/s. El principal desafío para estas tareas es ocasionado por las bajas velocidades del flujo, que en varias ocasiones han resultado indetectables para los equipos disponibles. Al ser limitado el volumen de datos recopilados, aún no es posible definir una ley altura-caudal para la sección.
En el sitio S11, próximo a Ignacio Correas, se ha colocado una escala que ha posibilitado la generación de una base de datos de niveles en crecimiento gracias a su accesibilidad y a la participación comunitaria.
Por medio del análisis de imágenes satelitales, se obtuvieron parámetros estadísticos de la morfología en planta del cauce. El arroyo presenta baja sinuosidad con valores de 1.05-1.06 en su traza, marcando un leve aumento de la misma en su tramo inferior (1.13). Las curvas del cauce presentan longitudes de arco medias del orden de 150m.
Como trabajo futuro, se prevé continuar el monitoreo en campo para ampliar la base de datos, que proporcionará información de partida para implementar y calibrar un modelo hidrodinámico, como también ampliar la caracterización morfológica del arroyo. Asimismo, se estudiará la influencia de la marea con mediciones simultáneas en S14 y S15, y se fortalecerá la ciencia ciudadana.

Dado que los autores no han encontrado publicaciones con datos de estas características, entienden que su divulgación supondrá también un aporte a investigadores de otras áreas del conocimiento interesados en la gestión de recursos hídricos de la región.

Los autores agradecen a vecinos de El Pescado por contribuir al relevamiento participativo de niveles.

BIBLIOGRAFÍA

[1] International Organization for Standardization, «ISO 748: Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats.,» ISO, 2007.

[2] L. Dominguez Ruben, K. Naito, R. R. Gutierrez, R. Szupiany y J. D. Abad, «Meander Statistics Toolbox (MStaT): A toolbox for geometry characterization of bends in large meandering channels,» *SoftwareX,* vol. 14, 2021.

[3] W. Thielicke y E. J. Stamhuis, «PIVlab– Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB,» *Journal of Open Research Software,* 2014.

MODELACIÓN FISICA DE TOMA TIROLESA

Masson Rodriguez, Julián1; Barros Abdala, Luciana; Francisco Varvasino,Juan; Lacunza, Esteban; Consoli Lizzi, Paula Andrea; Liscia, Sergio Oscar.

Laboratorio de Hidromecánica, calle 47 Nº200, La Plata, Buenos Aires, Argentina, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. - julimasson15@gmail.com

Introducción

Las tomas tirolesas son sistemas de captación de fondo, fabricados con rejillas y dispuestos longitudinalmente en la dirección del flujo, se utilizan clásicamente para derivar flujos medios en ríos de montaña continuos con transporte intensivo de sedimentos.

Estas estructuras poseen gran variedad de implementación dependiendo de su configuración geométrica. Los principales factores que afectan el funcionamiento de este tipo de estructuras son la longitud y geometría de las rejas, el ángulo respecto a la vertical de la reja, las condiciones del flujo de aproximación, entre otros.

La disposición y formas de las rejas toman un rol crucial en el funcionamiento de la estructura. Normalmente se acostumbra a colocar las barras de forma paralela al flujo, con el fin de que los sedimentos que queden retenidos entre los barrotes puedas desprenderse aguas abajo con ayuda del flujo. En la Figura 1 se puede apreciar un esquema de la obra.

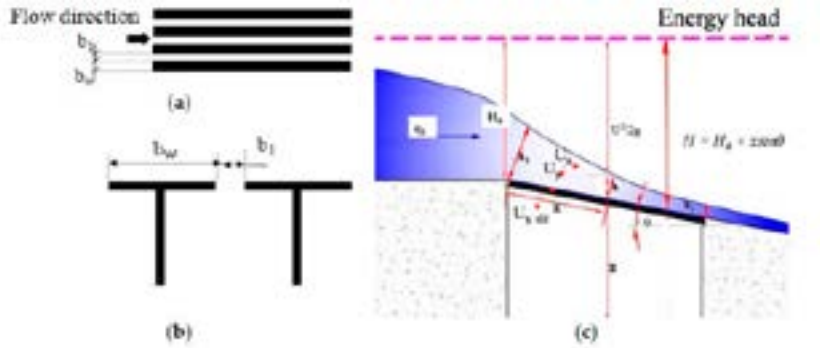


Figura 1: Esquema Toma Tirolesa[1]

El funcionamiento hidráulico sobre los sistemas de captación de fondo presenta un flujo tridimensional y espacialmente variado, dado por interacciones entre las barras y un alto nivel de turbulencia. Un parámetro crucial para el calculo del caudal derivado es el coeficiente de descarga C_{qH} que se define como la relación entre el caudal real que atraviesa la estructura y el caudal teórico que se obtendría bajo condiciones ideales. En cálculos teóricos se suele tomar como hipótesis que no hay disipación de energía a lo largo de la reja y la distribución de presiones es unidimensional e hidrostática, pero en estudios experimentales se pueden cuantificar los efectos de estas perdidas de energía.

El presente trabajo tiene como objetivo obtener los caudales derivados y el perfil de la superficie libre para un punto de funcionamiento del una toma tirolesa con barras tipo ”T”. Tanto la geometría del órgano derivador como el escenario han sido seleccionados a fin de comparar nuestros resultados con los reportados por Luis G. Castillo, Juan T. Garía y José M. Carrillo [1]. La metodología de trabajo seleccionada es la modelación física, por lo cual en este documento se exponen el diseño y la construcción del modelo, así como la ejecución de la campaña experimental y el análisis de resultados. Las tareas fueron realizadas en el canal

del banco de ensayos del Departamento de Hidráulica, en el marco de la asignatura Taller de Hidráulica Aplicada.

Parte experimental

El sistema bajo estudio comprende la estructura derivadora, y requiere además un tramo aguas arriba y aguas abajo de la misma que genere condiciones de contorno equiparables a las de un canal o curso de agua de montaña.

Las instalaciones disponibles en el Departamento de Hidráulica están dadas por un canal rectangular de 12 m de longitud, de pendiente variable, paredes transparentes y sección transversal de 0.6 x 0.6 m. Éste forma parte de un circuito cerrado alimentado por un tanque elevado capaz de proveer hasta 50 l/s. Aguas arriba del canal una válvula permite controlar el caudal ingresante, mientras que aguas abajo se ubica un canal secundario aforador provisto de vertedero triangular. El instrumental disponible incluye limnímetros que permiten relevar la superficie libre, tanto para caracterizar su evolución longitudinal en la estructura de derivación como para determinar la carga sobre estructuras aforadoras. Se cuenta además con cinta métrica para determinar progresivas, y con nivel y mira para determinar cotas y pendientes.

Diseño del modelo físico

El modelo físico de la estructura se ubica en el tramo medio del canal, en la seccion de la reja el flujo se bifura, donde parte del caudal ingresa hacia un canal derivador posicionado en la margen derecha.

La estructura de derivación se diseñó en escala prototipo. Se elevó 30 cm desde el fondo del canal para independizar el flujo respecto del tirante aguas abajo y a su vez disponer de un espacio libre bajo la reja. Allí se bifurca el flujo y se forman dos subcanales aguas abajo, que posibilitan cuantificar separadamente los caudales derivado y remanente gracias a la presencia de sendos vertederos aforadores aguas abajo. A su vez por debajo de las rejas se encuentra una subdivisión para los caudales incrementales Δq en función de un diferencial de progresiva ΔX, con el objetivo de discretizar longitudinalmente el caudal derivado. Se seleccionaron 10 progresivas equidistantes a lo largo de la reja y por debajo de ella se materializaron vanos, que reciben cada uno su propio Δq. Un gancho derivador móvil se posiciona en el vano n de manera que el caudal de los primeros n vanos se dirige hacia el canal de margen derecha, mientras el de los $(10 - n)$ situados aguas abajo junto con el caudal no derivado continúan por el canal de margen izquierda.

En la Figura 2 se muestra un esquema del modelo físico construido y en la Figura 3 su fotografía.

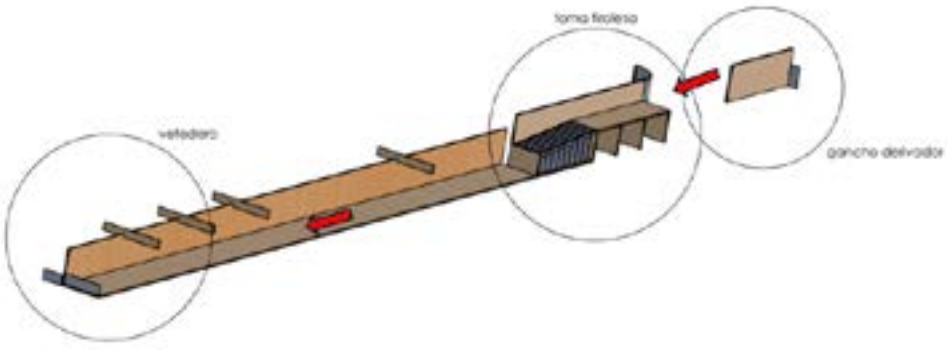


Figura 2: Esquema de modelo físico

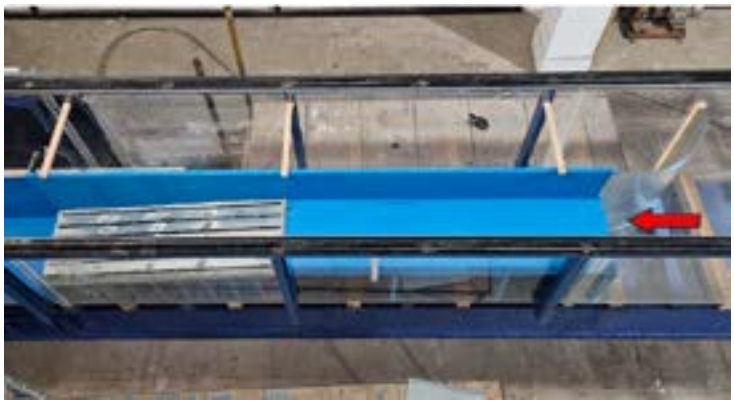


Figura 3: Fotografía del modelo físico de la toma tirolesa

Para la cuantificación de los caudales, se proyectaron dos vertederos rectangulares para el canal de margen izquierda y derecha, ubicados a 7.2 m aguas abajo de la toma tirolesa. Ambos vertederos tienen una altura de 10 cm respecto al fondo del canal.

Se adoptaron los caudales de estudio con el fin de replicar uno de los escenarios presentados por Luis G. Castillo y otros [1]. Se estableció un ancho de sector de toma de reja de 30 cm, lo que permitiría alcanzar caudales específicos máximos de 166 l/s/m.

Metodología

El escenario de análisis consiste en un caso de estudio de la bibliografía de referencia, donde el caudal total especifico q es de 53.8 l/s/m y el parámetro tan θ = 0.10, donde θ es el ángulo de la reja respecto de la horizontal, definido en Figura 1. La reja se encuentra posicionada con un ángulo de inclinación de 5° respecto a la horizontal, lo que favorece la entrada del flujo hacia el canal lateral.

Se seleccionó uno de los ratios empleados en el trabajo de referencia, el cual corresponde a m=0.22 ($m = b_1/b_w$, donde b_1 es el ancho de rejas y b_w el espacio entre ellas, según se define en la Figura 1), lo que da como resultado orificios rectangulares de 11 mm de ancho.

Por otro lado, se tomaron las alturas del pelo de agua equiespaciadas con un limnímetro en las 10 progresivas sobre la rejilla y coincidentes con las fajas en que se midieron caudales diferenciales, y en la zona de aducción con el fin de relevar la curva de remanso que se genera. En este caso, se observan curvas del tipo f_1, que se pueden apreciar en la Figura 4.



Figura 4: Fotografía del modelo físico con curvas de remanso.

Resultados y Discusión

Las mediciones efectuadas permitieron caracterizar la evolución longitudinal de la superficie libre y del caudal derivado. En primer lugar, se analizó la evolución de los caudales transportados por el canal principal y el canal derivador a medida que se avanzaba en la posición del gancho derivador. Este análisis permitió verificar si la bifurcación del flujo respetaba la ecuación de continuidad, es decir, que el caudal total se repartía adecuadamente entre ambos canales sin pérdidas significativas.

En la Figura 5 se observa que, a medida que el canal de margen izquierda (representado en azul) pierde caudal debido a la apertura progresiva de los vanos de derivación, el canal de margen derecha (en naranja) gana caudal de manera proporcional. El eje X de la figura representa la evolución de la posición según la cantidad de vanos abiertos en la reja de derivación, mientras que el eje Y indica los caudales medidos en litros por segundo (L/s). La distribución de caudales muestra que el sistema respeta el balance de masas esperado.

Para cuantificar posibles pérdidas en el modelo físico, se calculó el error en la conservación del caudal total, comparando la suma de los caudales medidos con el caudal total obtenido en el canal aforador secundario. Este error, representado en color verde en la misma figura, no supera el 1.6 % del caudal total, lo que indica que los errores de la medición son compatibles con los objetivos del estudio.

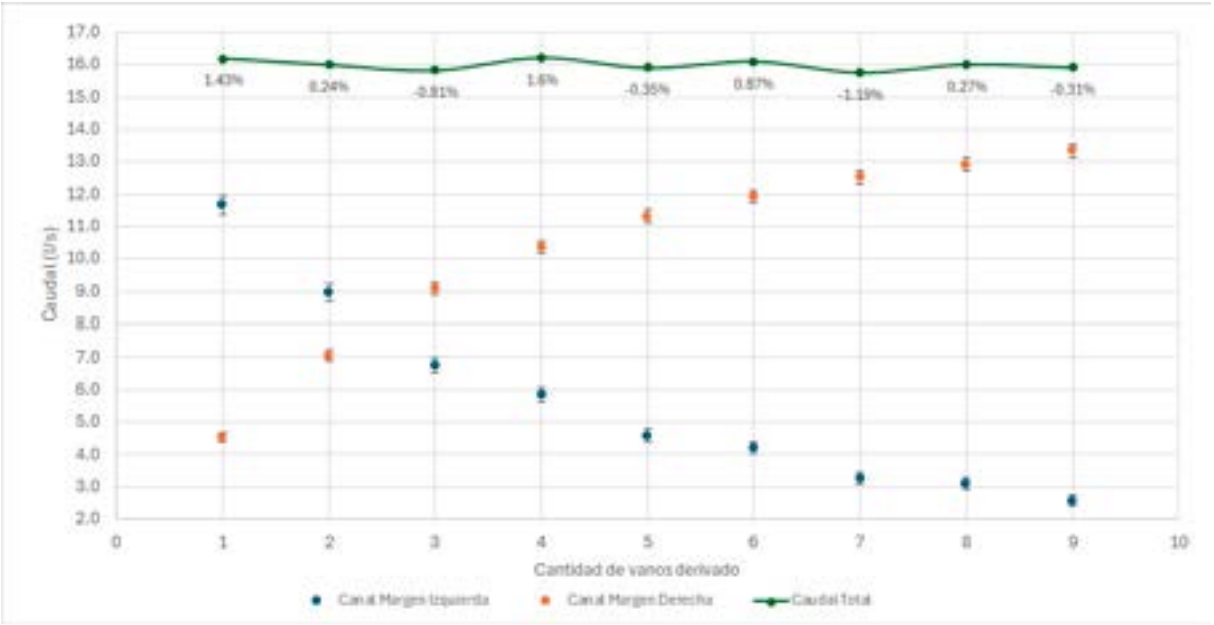


Figura 5: Resultados obtenidos de caudales según el punto de derivación adoptado

En cuanto al análisis de la evolución longitudinal de la superficie libre, se compararon las mediciones experimentales con el cálculo teórico del pelo de agua propuesto en [1].

En primer lugar, se calculó el coeficiente de descarga C_{qH} empleando la Ec. 0.1 propuesta la bibliografía de referencia .

$$C_{qH} = \frac{0{,}58 \cdot \exp\left(-0{,}75 \cdot \frac{x}{h_c} \cdot m\right)}{(1 + 0{,}9 \cdot \tan\theta)} \tag{0.1}$$

Este coeficiente depende del tirante crítico h_c, formado en la curva de remanso a la entrada de la toma tirolesa, el cual se calcula con la Ec. 0.2.

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B_0}} \tag{0.2}$$

En esta ecuación, B_0 representa el ancho del canal derecho en la entrada, con un valor de 0.3 m, mientras que x corresponde a la progresiva en la que se está realizando el cálculo. A partir de este coeficiente, se determina el caudal específico derivado en función de la posición, utilizando la Ec. 0.3.

$$\frac{dq}{dx} = C_{qH} m \sqrt{2g(H_0 + x \sin\theta)} \tag{0.3}$$

Para visualizar mejor las diferencias entre las mediciones experimentales y los cálculos analíticos, ambos se representan en la Figura 6, que muestra el perfil del pelo de agua y los caudales teóricos en comparación con los valores medidos.

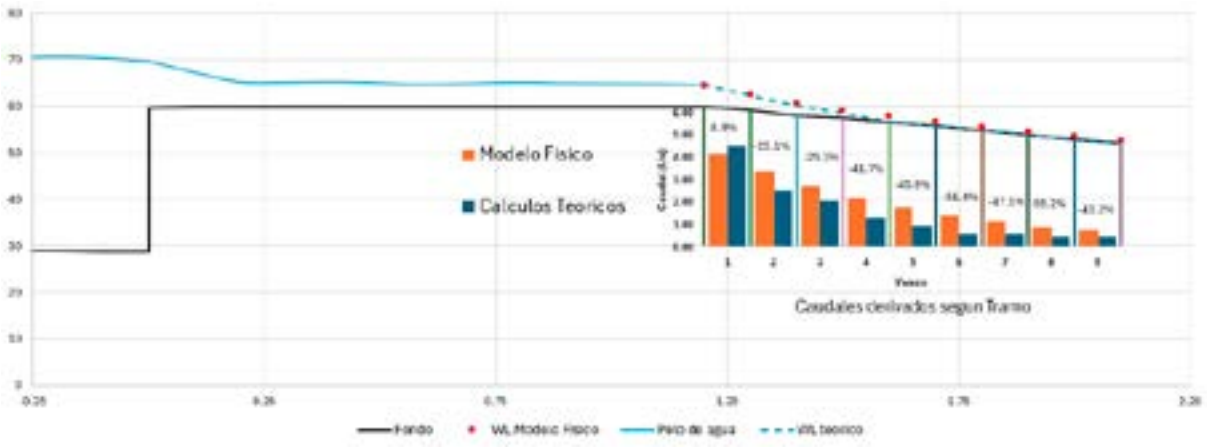


Figura 6: Gráfico bidimensional de caudales derivados y tirantes, de modelo físico y bibliografía.

En esta figura, el eje de abscisas representa la posición en la progresiva, mientras que el eje de ordenadas indica la cota, permitiendo una visualización espacial de la superficie libre. La línea negra representa el fondo de la estructura, mientras que la superficie libre se muestra en color celeste. Se observa un remanso en la progresiva 0 m, generado por la presencia del escalón en la estructura. A partir de la progresiva 1.2 m, el pelo de agua comienza a descender debido a la derivación de caudal a través de las rejas, lo que se registra en cada vano mediante el limnímetro, cuyos valores medidos se indican con puntos rojos.

Además, en la Figura 6, se incluyen gráficos de barras en cada progresiva de los vanos, donde se comparan los caudales derivados medidos en el modelo físico (en barras de color naranja) con los calculados a partir de las ecuaciones de la bibliografía de referencia (en barras de color azul). Se observa que los valores obtenidos mediante estas ecuaciones no coinciden completamente con los datos experimentales, especialmente en los casos donde la derivación del flujo es mayor. En particular, cuando el gancho derivador se desplaza aguas abajo, las diferencias entre los valores teóricos y experimentales alcanzan hasta un 50 %.

Estas discrepancias pueden deberse a diferencias en los instrumentos de medición utilizados, así como a la construcción del modelo físico. En el trabajo de referencia, la derivación se analizaba modificando la progresiva mediante la obstrucción de las rejas desde la embocadura del flujo, mientras que en este estudio se utilizó un gancho derivador lateral, diseñado para mantener una condición de flujo aguas abajo mas realista.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el modelo físico de la toma tirolesa con barras tipo ”T”funciona de manera adecuada, manteniendo un error en el balance de caudales menor al 1.6 %. Sin embargo, al comparar estos resultados con los de la bibliografía de referencia, se observan discrepancias significativas en los caudales derivados, lo que puede deberse a la utilización de diferentes técnicas y estrategias de medición.

Se propone como trabajo futuro, mejorar la precisión de las mediciones, incorporando por ejemplo el uso de cámaras fotográficas para medir la evolución de la superficie libre. Con estos ajustes y el estudio de mas escenarios, en el futuro se podrán proponer otras ecuaciones empíricas, como las proporcionadas en la bibliografía, lo que contribuiría a una mayor concordancia con nuestros resultados y facilitaría diseño de nuevas estructuras de derivación.

Además, estos avances podrían utilizarse para validar o calibrar modelos numéricos de toma tirolesa, optimizando así su capacidad predictiva. De esta manera, no solo se optimiza el diseño de las tomas tirolesas, sino que también se aporta al avance de la investigación en este campo, generando nuevas herramientas tanto experimentales como teóricas que podrán ser utilizadas por otros autores en futuros trabajos.

Referencias

[1] Juan T. García Luis G. Castillo y José M. Carrillo. “Influence of Rack Slope and Approaching Conditions in Bottom Intake Systems”. En: *MDPI* (2017).

Validación de un modelo CFD para la predicción de la dinámica de la superficie libre en resaltos hidráulicos

Leiza D'Angelo[1], Paula Consoli Lizzi[1], Sergio Liscia[1]

[1] *UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata*
Calle 47 Nº 200, La Plata (CP1900), Argentina
leizadangelo@gmail.com

1. Introducción

Los resaltos hidráulicos son fenómenos fundamentales en la ingeniería hidráulica, caracterizados por la transición de un flujo supercrítico a uno subcrítico, acompañada de una disipación significativa de energía y una intensa incorporación de aire. Estos procesos son relevantes en el diseño de estructuras de disipación de energía, como aliviaderos y cuencos de amortiguación, así como en aplicaciones ambientales, donde la transferencia de gases y la calidad del agua juegan un papel crucial. Sin embargo, la complejidad de las interacciones aire-agua y la naturaleza altamente turbulenta del flujo hacen que la modelación numérica de estos fenómenos sea un desafío considerable.

Este trabajo valida un modelo numérico basado en ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) para predecir la dinámica de la superficie libre en resaltos hidráulicos, comparando los resultados con datos experimentales. El estudio se enmarca dentro de un análisis más amplio sobre la incorporación de aire en flujos aire-agua, un fenómeno multiescala con interacciones complejas entre turbulencia, estructuras de flujo y burbujas. Estas interacciones hacen que las modelaciones mediante CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) sean computacionalmente demandantes. En este contexto, un modelo RANS ofrece una alternativa eficiente para capturar el fenómeno con un costo computacional significativamente menor en comparación con enfoques como las simulaciones SRS (Scale-Resolving Simulation).

Las simulaciones numéricas abarcan números de Froude (Fr) entre 2.4 y 7.5, cubriendo una amplia variedad de condiciones de flujo, desde resaltos débiles hasta altamente turbulentos. Aunque las configuraciones geométricas y las condiciones de flujo difieren entre los casos numéricos y experimentales, la adimensionalización de los resultados y su análisis en términos del número de Froude permiten una validación robusta y generalizable modelo.

2. Metodología

2.1. Generalidades

El estudio se basa en simulaciones numéricas bidimensionales de resaltos hidráulicos con un modelo RANS, empleando un cierre de turbulencia $k - \epsilon$. Las simulaciones se realizaron en un canal rectangular con condiciones de contorno específicas para reproducir resaltos hidráulicos estudiados experimentalmente. El análisis se realizó sobre secciones transversales específicas, seleccionadas para coincidir con las posiciones de medición experimental de perfiles de concentración y velocidad reportados en la literatura. Los resultados se analizaron durante un período de 10 segundos, determinado mediante un análisis de convergencia temporal que mostró que períodos más largos no producían cambios significativos en los resultados estadísticos.

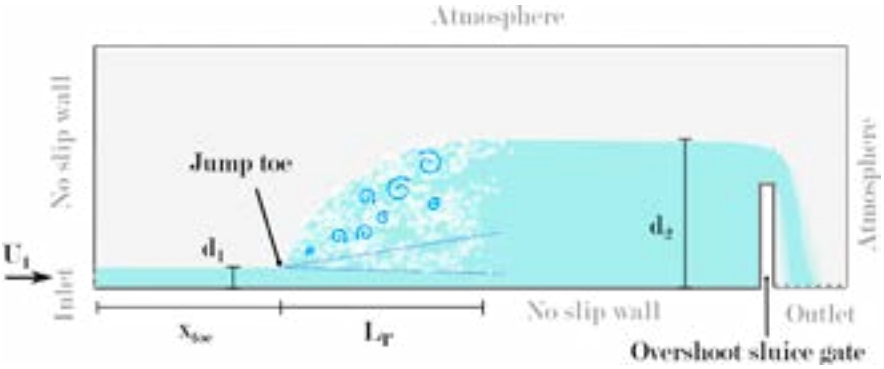


Figura 1: Esquema del resalto hidráulico modelado

2.2. Descripción del modelo teórico

Se realizaron simulaciones numéricas utilizando un modelo de mezcla trifásica (aire continuo, burbujas y agua) propuesto por [4]. Este modelo resuelve cuatro ecuaciones de conservación acopladas: conservación de la masa para la mezcla trifasica (Ec. 1), para la mezcla agua-burbuja (Ec.2), y para la fase burbuja (Ec. 3), y conservación de la cantidad de movimiento lineal para la mezcla trifasica (Ec. 4). Para capturar el fenómeno de esponjamiento de la superficie libre, se utiliza una versión modificada del método Volume of Fluid (VOF), que representa algebráicamente la interfaz entre las fases de aire y agua-burbujas.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot \left[\alpha_m (1-\alpha_m) \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho} \mathbf{u}_{m-a} + \alpha_b s \frac{\alpha_w}{\alpha_m + \alpha_b s} \frac{\rho_m}{\rho} \mathbf{v}_{b-w}^{\infty} \right] \tag{1}$$

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_m \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\alpha_m (1-\alpha_m) \mathbf{u}_{m-a}] = S_b \tag{2}$$

$$\frac{\partial \alpha_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_b \mathbf{u}) + \nabla \cdot \left[\alpha_b (1-\alpha_m) \mathbf{u}_{m-a} + \frac{\alpha_w^{1,5}}{\alpha_m} \mathbf{v}_{b-w} \right] + \nabla \cdot \left(\frac{\alpha_w}{\alpha_m} \mathbf{D}_b \nabla \alpha_b \right) = S_b \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p_{rgh} + \nabla \cdot \left(\mu_{eff} (\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v}^T) + \mathbf{T}_{b-w} + \mathbf{T}_{m-a} \right) - g \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + f_\sigma \tag{4}$$

Donde k es la fracción de fase (burbuja, agua, mezcla) $[-]$, α_k es la fracción volumétrica $[-]$, $\mathbf{v}$ es la velocidad ponderada por masa $[ms-1]$, $\mathbf{u}$ es la velocidad ponderada por volumen [m s-1], $\mathbf{u}_{m-a}$ es la velocidad relativa entre la mezcla (agua+burbuja) y el aire $[ms^{-1}]$, $\mathbf{S}_k$ es el término fuente $[s^{-1}]$, $\mathbf{u}_{b-w}$ es la velocidad relativa entre las burbujas y el agua $[m/s]$, ρ_k es la densidad $[kgm^{-3}]$, $\mathbf{D}_b$ es la difusividad de las burbujas $[m^2 s]$, $s = \rho_b/\rho_w - 1$ $[-]$, $p_{rgh} = p - \rho g \cdot \mathbf{x}$ $[Nm^{-2}]$, μ_{eff} es la suma de la viscosidad molecular y la viscosidad turbulenta $[kgm^{-1}s^{-1}]$, $T_{b-w} + T_{m-a}$ es la difusión de momento por el movimiento relativo entre fases $[kgm^{-1}s^{-1}]$ y f_σ es la fuerza de tensión superficial $[kgm^{-}2s^{-2}]$.

2.3. Validación del modelo numérico

El modelo se validó comparando el perfil promedio de la superficie libre, la correlación entre la posición horizontal del pie del resalto y la posición de la superficie libre, así como el análisis espectral de las frecuencias dominantes, con los resultados experimentales presentados por [2],

[1], [3], para números de Froude en el rango de 2.4 a 7.5. La posición del pie del resalto se determinó dinámicamente para cada paso temporal, identificando la ubicación que minimiza el error cuadrático medio (RMSE) entre los perfiles de velocidad numéricos y experimentales. Este enfoque permite capturar la naturaleza oscilatoria del fenómeno y su influencia en la dinámica de la superficie libre.

Para evaluar la relación temporal entre las variables estudiadas, se realizó un análisis de correlación cruzada (ec. 5). Este método permite identificar patrones de dependencia y desfases temporales entre las señales. Las señales fueron previamente normalizadas para asegurar que la comparación no estuviera influenciada por diferencias en las magnitudes absolutas.

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} x(t) \cdot y(t+\tau) \tag{5}$$

Donde $x(t)$ e $y(t)$ son las señales a comparar, τ es el desfase, y N es el número total de datos. Este análisis proporciona información sobre cómo las variaciones en una señal se relacionan con las variaciones en otra a medida que se introducen desfases temporales.

La frecuencia de las oscilaciones de la posición de la superficie libre se identificó mediante un análisis espectral utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicada a los datos de posición.

2.4. Casos experimentales

En la Tabla 1 se resumen los casos experimentales seleccionados para la validación del modelo numérico. Se incluyen datos de estudios previos realizados por [2], [1] y [3]. Para cada caso, se especifican las condiciones de flujo y el instrumento de medición utilizado.

Cuadro 1: Resumen de los casos experimentales seleccionados para la validación.

Referencia	Fr_1	d_1 [m]	U_1 [m/s]	Instrumento de medición
[2]	2.43 3.65 4.8	0.046 0.032 0.021	1.64 2.05 2.19	Sonda de resistividad de hilo
[1]	6.4	0.018	2.69	Medidores acústicos de desplazamiento
[3]	5.1 7.5	0.02 0.02	2.26 3.32	Medidores acústicos de desplazamiento

3. Resultados

3.1. Posición media de la superficie libre

La Figura 2 muestra la comparación entre los perfiles de superficie libre adimensionales (η/d_1) obtenidos numéricamente y los datos experimentales para diferentes números de Froude. Los resultados numéricos muestran una buena concordancia con los datos experimentales de [2], [1] y [3].

El modelo captura correctamente tres aspectos fundamentales: (i) la evolución del perfil de superficie libre a lo largo del resalto, (ii) el incremento en la altura máxima del resalto con el número de Froude, y (iii) la longitud característica del resalto hidráulico. La adimensionalización de las variables permite una comparación directa entre casos con diferentes condiciones de flujo, validando la capacidad predictiva del modelo para un amplio rango de números de Froude.

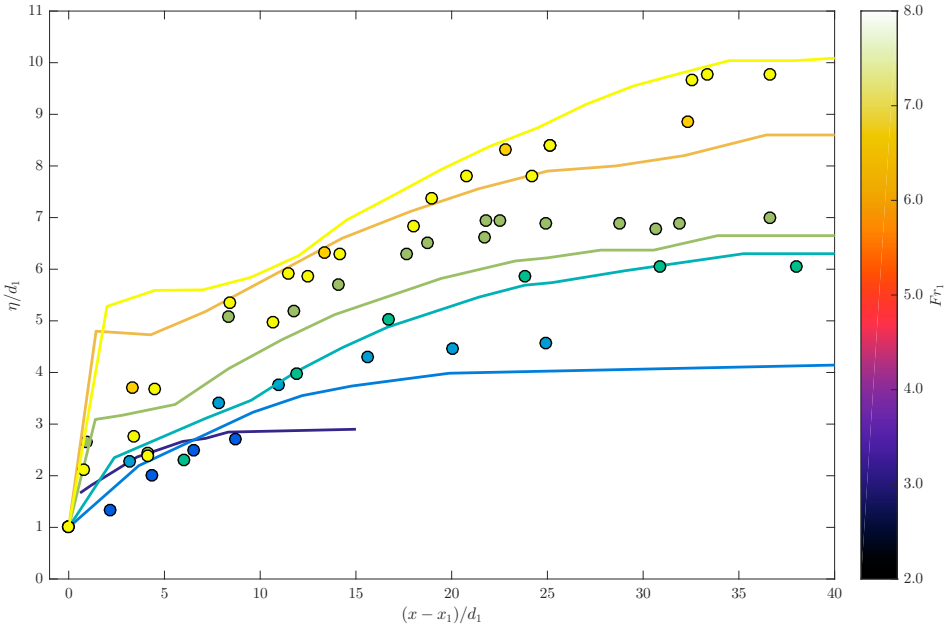


Figura 2: Comparación entre perfiles medios adimensionales de superficie libre (η/d_1) obtenidos numéricamente (línea contínua) y datos experimentales (círculos) de [2], [1] y [3] para diferentes números de Froude, en función de la posición adimensional $(x - x_1)/d_1$

3.2. Correlación cruzada

Se correlacionaron las posiciones horizontales del pie del resalto con la posición de la superficie libre en distintas secciones transversales para cada caso. Los resultados se presentan en una gráfica de correlación cruzada, donde el eje `x` representa el desfase temporal (en índices de tiempo) y el eje `y` muestra el coeficiente de correlación. El máximo coeficiente de correlación ($R_{máx}$) indica el grado más alto de relación entre las dos señales, mientras que su correspondiente desfase ($\tau_{máx}$) proporciona información sobre el tiempo de respuesta o sincronización entre ellas.

Para este análisis, se correlacionó la posición instantánea del pie del resalto, determinada mediante la minimización del RMSE (root-mean-square error) en cada paso temporal, con la elevación de la superficie libre en diferentes secciones transversales.

La Figura 3 presenta la correlación cruzada entre la posición del pie del resalto y la superficie libre para Fr = 7.5 en cuatro secciones transversales. El análisis revela tres características principales: (i) un máximo de correlación de aproximadamente 0.7 cerca del desfase cero, indicando una respuesta de la superficie libre acorde al movimiento del pie del resalto, (ii) una estructura oscilatoria periódica que evidencia un acoplamiento fuerte entre ambos fenómenos, y (iii) una atenuación gradual de la correlación con el aumento del desfase temporal.

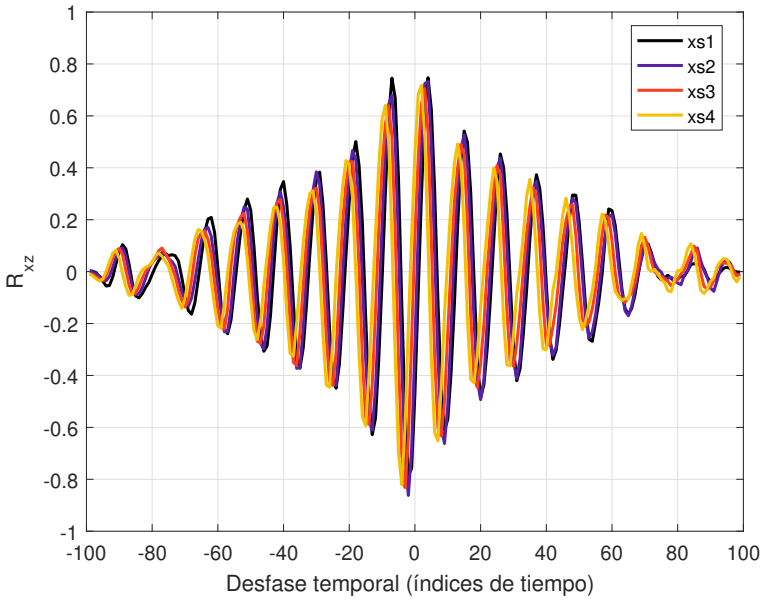


Figura 3: Correlación cruzada entre la posición del pie del resalto y la elevación de la superficie libre para Fr = 7.5 en cuatro secciones transversales aguas abajo del pie del resalto.

3.3. Análisis espectral

El análisis espectral, realizado mediante la FFT de la señal temporal de la posición de la superficie libre, revela un único pico de frecuencia dominante, asociado con el patrón oscilatorio global del resalto hidráulico. En contraste, los resultados experimentales de [3] muestran dos frecuencias claramente diferenciadas: una principal y una secundaria. La ausencia de frecuencias secundarias en las simulaciones numéricas puede atribuirse a las limitaciones del enfoque RANS, donde las fluctuaciones turbulentas de pequeña escala son promediadas y no se resuelven explícitamente. Como consecuencia, el modelo captura preferentemente las oscilaciones de baja frecuencia, vinculadas a estructuras de gran escala.

Esta característica explica por qué la frecuencia dominante obtenida numéricamente coincide con las frecuencias secundarias reportadas experimentalmente. La frecuencia dominante se utilizó para calcular el número de Strouhal ($St = fd_1/U_1$), que relaciona la frecuencia de oscilación con parámetros característicos del flujo. La Figura 4 muestra que el número de Strouhal disminuye con el aumento del número de Froude, una tendencia que coincide con los datos experimentales. Esta consistencia valida la capacidad del modelo para capturar las oscilaciones de gran escala.

4. Conclusiones

En este trabajo se validó un modelo numérico basado en ecuaciones RANS para predecir la dinámica de la superficie libre en resaltos hidráulicos. La validación, realizada mediante comparación con datos experimentales, incluyó el análisis de perfiles medios de superficie libre, correlaciones temporales entre el movimiento del pie del resalto y las fluctuaciones de superficie, y características espectrales de las oscilaciones.

El modelo demostró una notable capacidad para reproducir los perfiles medios de superficie libre, capturando correctamente la evolución espacial del resalto y su dependencia con el número de Froude. Además, el análisis de correlación cruzada reveló un fuerte acoplamiento entre el mo-

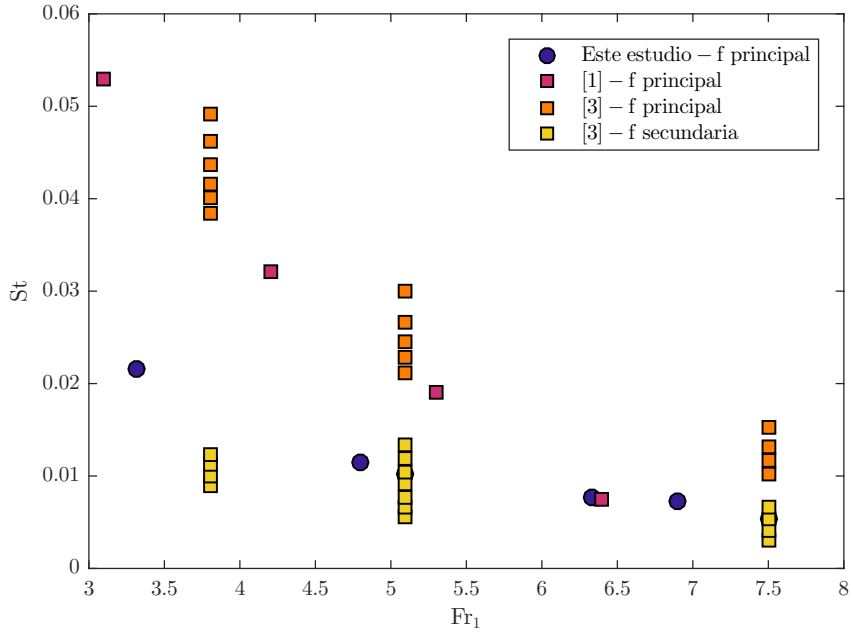


Figura 4: Número de Strouhal ($St = fd_1/U_1$) vs número de Froude. Resultados numéricos (círculos) y datos experimentales (cuadrados) de frecuencias dominantes y secundarias

vimiento del pie del resalto y las fluctuaciones de la superficie libre, con coeficientes de correlación de hasta 0.85, evidenciando la capacidad del modelo para representar la naturaleza oscilatoria del fenómeno.

En cuanto al análisis espectral, las frecuencias dominantes obtenidas numéricamente (0.9-1.4 Hz) mostraron mayor concordancia con las frecuencias secundarias reportadas experimentalmente, lo que sugiere que el modelo RANS captura preferentemente las oscilaciones de baja frecuencia asociadas a estructuras de gran escala. Esta tendencia se refleja también en la variación del número de Strouhal, que disminuye con el aumento del número de Froude, en concordancia con los datos experimentales.

Los resultados validan la aplicabilidad del modelo para el estudio de la dinámica de superficie libre en resaltos hidráulicos, ofreciendo una alternativa computacionalmente eficiente. Futuros trabajos podrían enfocarse en la extensión del modelo a simulaciones tridimensionales, la evaluación de otros cierres de turbulencia, o su aplicación a configuraciones geométricas más complejas.

Referencias

[1] F. Murzyn and H. Chanson. Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental observations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(7):1055–1064, 2009.

[2] F. Murzyn, D. Mouaze, and J. R. Chaplin. Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(1):141–154, 2005.

[3] H. Wang. *Turbulence and air entrainment in hydraulic jumps*. PhD thesis, The University of Queensland, 2014. PhD Thesis.

[4] F. Zabaleta, S. Márquez Damián, and F. A. Bombardelli. A novel three-phase mixture approach for the numerical modeling of self-aerated flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 408:115958, 2023.

MODELACION NUMÉRICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ALREDEDOR DE UN ROMPEOLAS

Reyes Mendoza, Gian; D'Angelo, Leiza; Vath, Brenda; Liscia, Sergio
Laboratorio de Hidromecánica, calle 47 Nº200, La Plata, Buenos Aires, Argentina, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
giansal723@gmail.com

1. Introducción

El transporte de sedimentos es un fenómeno clave en la dinámica de sistemas fluviales y costeros, con implicaciones significativas en la erosión, sedimentación y estabilidad de estructuras hidráulicas. Comprender estos procesos permite diseñar estrategias más eficientes para la gestión de cuerpos de agua, evitando problemas como la acumulación excesiva de sedimentos en canales de navegación o la socavación de infraestructuras costeras.

Entre los modelos matemáticos disponibles para la cuantificación del transporte de sedimentos, la ecuación de Engelund-Hansen (1967) se destaca por su capacidad de estimar el flujo de sedimentos en función de las características del flujo y del lecho. Esta ecuación es especialmente útil en entornos donde el régimen de flujo es predominantemente turbulento y el transporte de sedimentos ocurre en la capa superior del lecho y tiene un rango de aplicación para arena media (100 μm) a arena gruesa (200 μm).

En este trabajo, se implementa un modelo numérico basado en la ecuación de continuidad del transporte de sedimentos junto con la fórmula de Engelund-Hansen, aplicado a la evolución morfológica de un entorno costero con presencia de una estructura rompeolas. Se evalúan las tasas de erosión y deposición en un dominio bidimensional horizontal, considerando las interacciones entre el flujo y el lecho sedimentario.

El código y el postprocesamiento de los resultados fueron desarrollados completamente en MATLAB, permitiendo una representación detallada de los patrones de transporte de sedimentos. Se analizan perfiles longitudinales, distribuciones de velocidades y mapas de curvas de nivel para identificar zonas de socavación y deposición.

2. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar y aplicar un modelo numérico basado en la ecuación de Engelund-Hansen para analizar el transporte de sedimentos en un entorno costero con una estructura rompeolas. A través de simulaciones numéricas en MATLAB, se busca:

- Cuantificar las tasas de erosión y deposición en función de las condiciones del flujo.
- Evaluar la evolución morfológica del lecho sedimentario bajo la influencia de las corrientes marinas.
- Identificar patrones de sedimentación y socavación mediante el análisis de perfiles longitudinales y curvas de nivel.
- Proporcionar una herramienta computacional que facilite el estudio y la planificación de obras hidráulicas en ambientes costeros.

Este estudio permite una mejor comprensión de los procesos de transporte de sedimentos, contribuyendo al diseño eficiente de estructuras hidráulicas y estrategias de mitigación de la erosión costera.

3. Metodología y materiales.

3.1. Modelo Numérico

Se implementó un modelo 2D en MATLAB que resuelve la Ecuación de Exner (1925), la cual plantea el principio de conservación de masa aplicada a los sedimentos:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right)$$

Ecuación 1. Ecuación de Exner

Donde η es la elevación del lecho, λ la porosidad del sedimento, y q_x, q_y el transporte de sedimentos.

3.2. Fórmula de Engelund-Hansen:

$$q_S = 0{,}05 \cdot \frac{\tau_b^{45}}{f_b} \cdot d\sqrt{(\rho_s - \rho_w)gd}$$

Ecuación 2. Ecuación de Engelund-Hansen

donde τ_b es el esfuerzo cortante en el lecho, f_b el coeficiente de fricción, y d el diámetro del sedimento, d el diámetro del sedimento, ρ_s la densidad de sedimento y ρ_w la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad

3.3. Configuración del Dominio

- Malla: 70 nodos en X (350 m) × 40 nodos en Y (200 m), con Δx=Δy=5 m.
- Parámetros del Sedimento:

Diámetro de partícula(d)	**0.001m**
Densidad del sedimento ρ_s)	**2650kg/m³**
Coeficiente de fricción (f_b)	**0.001**

Tabla 1. Parámetros del sedimento (escenario base)

El desarrollo de este estudio se basó en la implementación de un modelo numérico que describe el transporte de sedimentos mediante la ecuación de continuidad y la fórmula de Engelund-Hansen. Para ello, se definió un dominio de estudio representando un entorno costero bidimensional con la presencia de una estructura rompeolas, estableciendo una batimetría plana inicial y considerando las interacciones entre el flujo y el lecho sedimentario.

Las propiedades del sedimento fueron caracterizadas mediante un diámetro medio de

partícula de 0.001 m y una densidad de 2500 kg/m³, mientras que el coeficiente de fricción del lecho se fijó en 0.001. El campo de velocidades inicial fue impuesto con base en condiciones hidrodinámicas típicas de zonas costeras, permitiendo analizar su interacción con el transporte de sedimentos.

El modelo fue implementado en MATLAB utilizando esquemas de diferencias finitas para la discretización espacial y temporal. La simulación numérica se llevó a cabo durante un período de 150 días, permitiendo observar la evolución de la morfología del lecho sedimentario bajo la acción del flujo. A partir de los resultados obtenidos, se generaron perfiles longitudinales, distribuciones de velocidades y mapas de curvas de nivel para identificar zonas de socavación y deposición. Estos análisis facilitaron la identificación de regiones críticas de erosión en la base del rompeolas y la redistribución de sedimentos en el dominio de estudio.

4. Resultados

Escenario Base: Evolución Temporal (0-150 días)

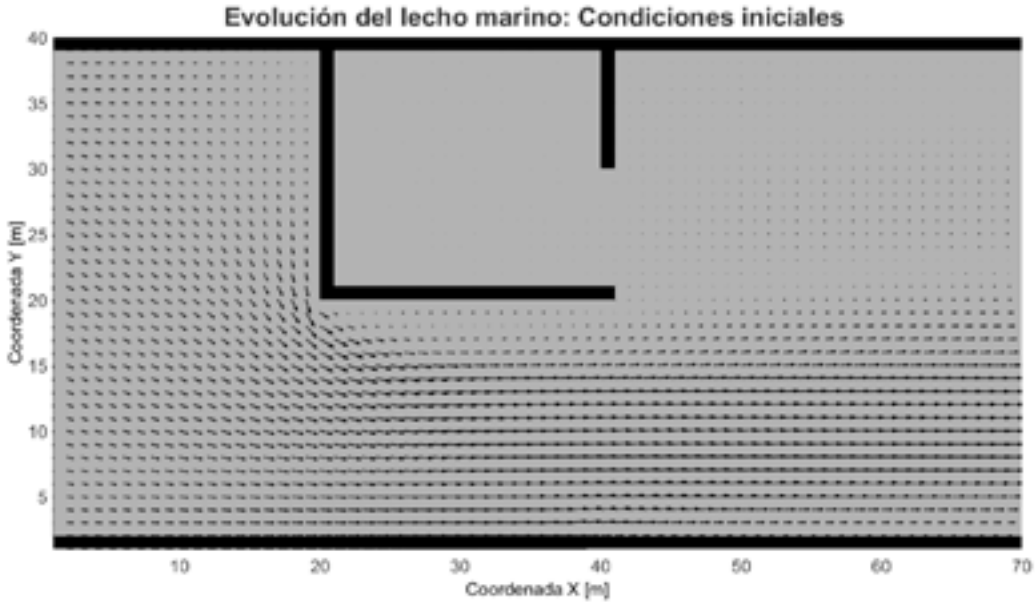


Figura 1. Dominio de estudio y condiciones iniciales

La figura 1 muestra la batimetría inicial del dominio de estudio, donde se destaca la presencia de un rompeolas en forma de "L". La estructura del rompeolas se representa en negro, indicando una profundidad de 0 m, mientras que el fondo marino circundante aparece en gris, con una profundidad constante de 4 m. El dominio espacial abarca 350 m en dirección X y 200 m en dirección Y. En esta etapa inicial, la batimetría se presenta plana, con el rompeolas definiendo una zona protegida al sur de su brazo en "L". Esta configuración sirve como punto de partida para analizar la evolución del lecho marino bajo la influencia de las corrientes. Los vectores de velocidad, representados con flechas negras, muestran la dirección y magnitud del flujo, permitiendo más adelante hacer una correlación con los focos de erosión.

Se simuló la evolución morfológica del lecho durante 150 días, analizando cambios en intervalos de 30 días. Los resultados muestran:

- **Primeros 30 días**: Erosión incipiente (≤0.12 m) en el extremo del rompeolas (X=55–65 m, Y=25–35 m). Depósitos mínimos (≤0.08 m) en zonas alejadas

(X=10–20 m, Y=50–60 m).

- **60–90 días**: Aceleración de la erosión (0.25→0.38 m) debido a corrientes sostenidas (>1.0 m/s). Depósitos se concentran al sur del rompeolas, formando una barrera natural (Y=55–65 m).
- **120–150 días**: Socavación crítica (0.60 m) cerca de la base del rompeolas, con riesgo de inestabilidad estructural. Transporte longitudinal: Sedimentos se desplazan 40 m aguas abajo (X=80–120 m).

Tiempo [días]	Erosión máxima [m]	Depósito máximo [m]
30	0.12	0.08
60	0.25	0.15
90	0.38	0.22
120	0.49	0.30
150	0.60	0.37

Tabla 2. Evolución del lecho a lo largo del tiempo (escollera en L)



Figura 2. Evolución del lecho a los 150 días (escollera en L).

La figura 2 ilustra los cambios morfológicos después de 150 días de simulación. Se observa una erosión significativa en la esquina interna de la "L" del rompeolas (X=60–70 m, Y=25–35 m), con una profundización máxima de 0.60 m, asociada a velocidades de flujo superiores a 1.5 m/s. A lo largo del brazo principal del rompeolas (X=30–50 m), la erosión es moderada, con valores entre 0.2 y 0.4 m. Por otro lado, en la zona protegida al sur de la estructura (X=10–30 m, Y=50–70 m), se acumulan sedimentos con espesores de hasta 0.37 m, debido a la reducción de las velocidades del flujo (<0.5 m/s). Además, se identifican lóbulos de depósito menores (0.1–0.2 m) aguas abajo (X=80–120 m).

El campo de velocidades presentado previamente correlaciona las zonas de alta velocidad con los focos de erosión. La forma en "L" del rompeolas genera un flujo secundario que redistribuye los sedimentos, creando un equilibrio dinámico entre erosión localizada y

deposición en áreas protegidas.

Se estudia un nuevo escenario, que modifica la geometría de la escollera, utilizando un chaflán a 45°, lo que alteró significativamente los patrones de flujo y transporte de sedimentos.

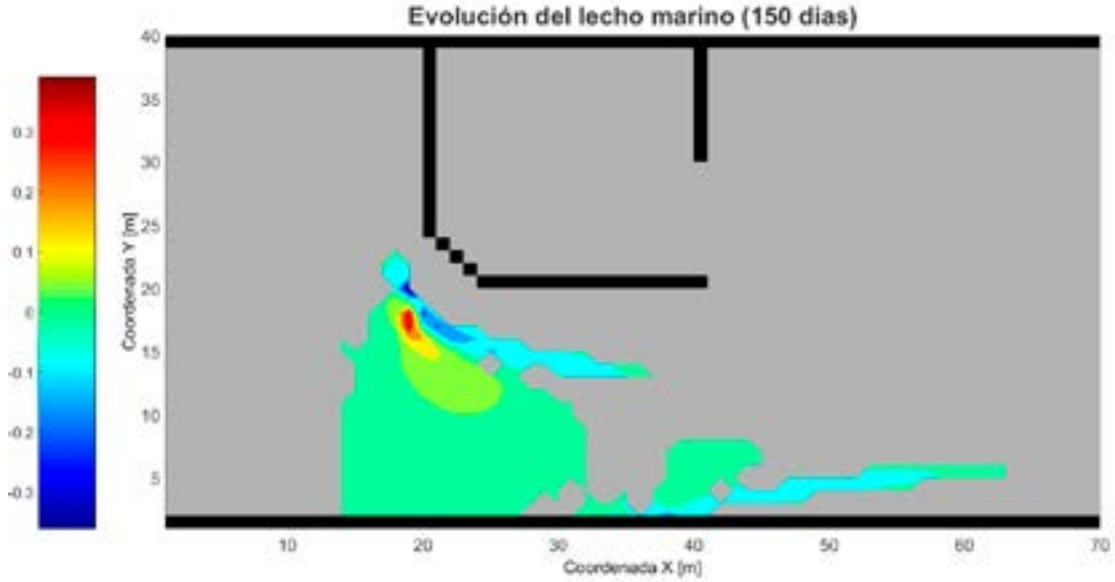


Figura 3. Evolución del lecho a los 150 días (escollera con chaflán).

La nueva configuración generó un flujo secundario más intenso, aumentando la erosión en la esquina interna de la estructura (0.60 m) y redistribuyendo los sedimentos hacia zonas más alejadas aguas abajo (X=80–130 m). Aunque la deposición en la zona protegida disminuyó ligeramente (0.37 m frente a 0.40 m en la configuración original), la escollera demostró una mayor eficiencia en la protección de áreas críticas. Este escenario resalta la importancia de la geometría en la dinámica sedimentaria y su impacto en la estabilidad costera.

Tiempo [días]	Erosión máxima [m]	Depósito máximo [m]
30	0.15	0.10
60	0.30	0.18
90	0.45	0.25
120	0.55	0.32
150	0.60	0.37

Tabla 3. Evolución del lecho a lo largo del tiempo (escollera con chaflán)

- Erosión:
  - La erosión aumenta progresivamente, alcanzando un máximo de **0.60 m** a los 150 días. Este valor es ligeramente superior al observado en el caso del rompeolas en "L" (0.55 m), lo que sugiere que la nueva geometría intensifica el esfuerzo cortante en la esquina interna de la estructura.
  - La tasa de erosión es más alta en los primeros 60 días (0.15→0.30 m), estabilizándose después de 90 días.

- Depósito:
  - El depósito máximo es de **0.37 m** a los 150 días, ligeramente menor que en el caso del rompeolas en "L" (0.40 m). Esto indica que la nueva geometría

redistribuye los sedimentos de manera más eficiente hacia zonas alejadas.
  - La acumulación de sedimentos crece de manera lineal, con una tasa constante de ≈0.02 m cada 30 días.

- Comparación con el rompeolas en "L":
  - La erosión es un **9% mayor** en este escenario, mientras que el depósito es un **7.5% menor**.
  - Esto confirma que la geometría de la escollera tiene un impacto significativo en la dinámica sedimentaria, aumentando la erosión localizada, pero mejorando la protección en áreas críticas.

5. Conclusiones

El modelo desarrollado ofrece una aproximación numérica para el estudio del transporte de sedimentos en entornos costeros, proporcionando información relevante para el diseño y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas. Los resultados obtenidos permiten evaluar la dinámica de los sedimentos y su impacto en la estabilidad de estructuras costeras, contribuyendo al desarrollo de estrategias más efectivas para la gestión de zonas de erosión y sedimentación.

- **Geometría y erosión:** La nueva forma de la escollera aumenta la erosión en la esquina interna debido a un flujo secundario más intenso, pero mejora la protección en zonas críticas.
- **Transporte longitudinal:** Los sedimentos se desplazan más lejos aguas abajo (50 m frente a 40 m en el caso del rompeolas en "L"), lo que sugiere una redistribución más eficiente.
- **Eficiencia del modelo:** El modelo numérico demostró ser robusto para evaluar diferentes configuraciones de estructuras costeras, proporcionando resultados consistentes con la teoría de transporte de sedimentos.

6. Bibliografía

- Apuntes del curso Transporte de Sedimentos, UNLP, Fabián Bombardelli, 2024.
- Computational Modelling in Hydraulic and Coastal Engineering, G. Koutitas – D. Scarlatos, 2016.
- 1D SEDIMENT TRANSPORT MORPHODYNAMICS with applications to RIVERS AND TURBIDITY CURRENTS, Gary Parker, November 2004.
- Sediment Transport, University of Illinois – Urbana Champaign, Marcelo H. García, Junio 2006.

CIALAEROESPACIALAERO

ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMO-ÓPTICAS DE UN SATÉLITE EN ÓRBITA

Martinez, Mariano A.; Rodriguez Sartori, Juliana; Caminos Báez, Martina; Russo Martinez, Santiago
Grupo de Control Térmico Numérico – UIDET GEMA – mmartinezk@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Los vehículos espaciales funcionan bien y duran más cuando sus componentes se mantienen dentro de cierto rango de temperaturas. El ambiente espacial, hostil, somete al satélite a continuas variaciones cíclicas de temperatura, dependientes de la órbita [1][2].

El llamado *Subsistema de Control Térmico* [3] es el encargado de analizar la teoría y la práctica por la cual esas temperaturas son producidas y de implementar los medios necesarios para mantenerlas dentro del rango exigido.

El Control Térmico de Satélites se basa en los principios de transferencia térmica [5]. El flujo neto de energía térmica es siempre hacia afuera. El satélite produce calor y debe disiparlo. La radiación es el único medio para eliminar la energía residual de un satélite hacia el espacio. Este proceso es altamente dependiente de las propiedades ópticas de las superficies, las que deben estar definidas en la etapa de diseño, ajustadas durante los ensayos de verificación y validación, y monitoreadas durante toda la vida útil del satélite, ya que su exposición al ambiente espacial las degrada en forma continua. Esto último, implica un particular desafío, ya que, ante la imposibilidad de medir las propiedades ópticas del satélite en vuelo, estas deben ser estimadas de la manera más precisa posible.

En el presente trabajo se expondrá la metodología empleada para realizar el seguimiento de la degradación de las propiedades ópticas durante toda la vida útil de los satélites SAOCOM.

Introducción

Marco Teórico:

Es sabido que el calor puede transmitirse por tres modos: la **conducción**, que es la transferencia que ocurre en un medio estacionario con gradiente de temperatura; la **convección**, que ocurre entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a distinta temperatura; y la **radiación** que es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas que ocurre desde cualquier superficie a temperatura mayor que 0K [5]. El primero y el último de estos modos están siempre presentes en un satélite, y constituyen el mecanismo por el cual el calor generado por sus sistemas (disipación) es eliminado hacia el espacio. La conducción permite que el calor generado en el interior del satélite llegue a los radiadores que están en la superficie, mientras que la radiación lo expulsa a través de estos.

La capacidad de emitir calor de una superficie ideal es función de la cuarta potencia de su temperatura absoluta, como lo expresa la ley de Stefan-Boltzmann [5]:

$$E_b = \sigma {T_s}^4$$

donde E_b es la Potencia Emisiva de la superficie ideal (Cuerpo Negro), σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T_s es la temperatura absoluta de la superficie. A su vez, la temperatura de esta superficie estará dada por un equilibrio entre el flujo de calor que arriba a ella por conducción, y los flujos de radiación que ella absorbe e irradia.

Cuando la superficie no es ideal, su capacidad para emitir radiación, E, es una fracción de la ideal. Para su cálculo se define un coeficiente llamado **Emisividad**, ε, tal que:

$$E = \varepsilon E_b$$

Algo similar ocurre con la energía recibida. Si definimos la **Irradiación**, G, como la radiación que recibe una superficie desde su entorno, en una superficie ideal el 100% de esta será absorbida, mientras que en una real una parte se absorberá (G_{abs}) y otra será reflejada (G_{refl}). Así se definen otros dos coeficientes, la **Absortividad** y la **Reflectividad**.

$$G_{abs} = \alpha G$$

$$G_{refl} = \rho G$$

En conjunto, estos tres coeficientes se conocen como *Propiedades Ópticas* o *Propiedades Superficiales* del material [5].

La absortividad y la emisividad son función de la longitud de onda, por lo tanto, se define un valor para la luz solar y otro para la infrarroja. Asimismo, en base a la ley de Kirchoff de la radiación térmica, puede demostrarse que para una dada longitud de onda la Emisividad y la Absortividad tienen el mismo valor [5].

$$\alpha = \varepsilon \qquad ; para\ una\ \lambda\ dada$$

Sobre esta base, es costumbre trabajar con un valor de α y uno de ε. Sabiendo que:

$$\alpha = \alpha^S = \varepsilon^S$$

$$\varepsilon = \varepsilon^{IR} = \alpha^{IR}$$

A partir de estos conceptos se plantea el balance energético en un radiador:

$$q^d + \alpha^s(q^S + q^A) + \varepsilon\, q^E = \varepsilon\sigma T^4$$

donde: q^d: Calor generado volumétricamente
q^S: Calor solar
q^A: Albedo
q^E: Radiación Terrestre
α^S: Absortividad Solar
ε: Emisividad Infrarroja

Degradación:

Con el transcurso del tiempo, las propiedades ópticas de los materiales se van degradando debido a las constantes “agresiones” a las que se ve sometido el satélite en el hostil ambiente espacial [1][2]. La degradación de las propiedades ópticas de los radiadores tiene como consecuencia un empeoramiento de su capacidad para eliminar el calor residual al espacio, lo que redunda en un paulatino aumento de su temperatura global. Por tal motivo, en todos los

cálculos preliminares se emplean valores de propiedades ópticas denominadas *Begining of Life* (BOL) y *End of Life* (EOL). Correspondiendo las primeras a los valores de las propiedades ópticas sin degradación y las últimas a las mismas con el valor previsto para el final de la vida útil del satélite.

Entre los valores BOL y los EOL existe un continuo de valores intermedios que las Propiedades Ópticas pueden tomar. Suele ser de interés, a la hora de analizar la performance actual del satélite, determinar el valor aproximado de estas propiedades periódicamente. Es así que, una vez al año y con dicho fin, se efectúan las tareas que describiremos a continuación.

Telemetría vs. Modelo Térmico Matemático (TMM):

Para el análisis, diseño y desarrollo de un satélite se crea el llamado “Modelo Térmico Matemático” (TMM) que debe reproducir, de manera precisa su comportamiento térmico en las distintas etapas de su vida. Asimismo, las temperaturas de un satélite son continuamente monitoreadas durante su vida útil, mediante un gran número de sensores distribuidos en lugares adecuados.

Antes del lanzamiento del satélite los resultados del TMM se verifican, correlacionándolos con los obtenidos de ensayos en cámaras de termovacío. Poco después del lanzamiento [4], cuando el satélite está en su órbita definitiva, se realiza la primera correlación del TMM con datos de telemetría para ajustarlo a la situación BOL [6].

Luego de esto, cada año se adapta el TMM para ajustarlo a los datos de temperatura obtenidos de la Telemetría. Para esto se modifican las PTO de los radiadores de manera que el TMM reproduzca, de la manera más exacta posible, las temperaturas reportadas en vuelo. De esta manera se cuantifica la degradación expresando los valores de las PTO en una escala porcentual (0% a 100%) entre los valores *Begining of Life* y *End of Life* previstos [6].

Esta tarea de ajuste es iterativa y tiene un gran componente artesanal. Deben ir modificándose las PTO de cada uno de los radiadores hasta lograr la distribución de temperaturas adecuada.

Resultados

Degradación y Calentamiento:

Tomaremos como ejemplo el trabajo realizado sobre uno de los siete paneles que componen la antena SAR de SAOCOM 1A. En la Tabla 1 podemos observar las temperaturas relevadas en vuelo un año después del lanzamiento (columna amarilla) y los valores calculados por el TMM ajustado inmediatamente después del lanzamiento (columnas en rojo). Al compararlos se observa que el error no es muy alto, pero en muchos sensores (TRM) supera ampliamente los 3ºC. Por lo tanto, el TMM debe ajustarse. Al modificar las PTO obtenemos las temperaturas y errores mostrados en las columnas verdes que son mucho más bajos, ahora el error promedio, considerando todos los paneles, es de 2ºC y el Desvío Estándar es de 1,02ºC [6].

				In Flight Temperature	8th level TMM		9Ath level TMM	
				HO Test	TMM HO	Error	TMM HO	Error
X1	CTR 4	A3S	TRM5	19.6	17.5	2.1	18.1	1.5
			TRM4	19.9	17.8	2.1	18.4	1.5
			TRM3	21.3	18.2	3.1	18.8	2.5
			TRM2	22.0	19.0	3.0	19.5	2.5
			TRM1	22.4	19.3	3.1	19.8	2.6
	CTR 3	A3S	TRM5	21.0	20.1	0.9	20.6	0.4
			TRM4	21.3	20.0	1.3	20.4	0.9
			TRM3	22.0	20.0	2.0	20.5	1.5
			TRM2	22.7	20.6	2.1	21.0	1.7
			TRM1	23.1	20.9	2.2	21.2	1.9
	CTR 2	A2S	TRM5	22.0	20.7	1.3	21.1	0.9
			TRM4	21.3	20.1	1.2	20.5	0.8
			TRM3	22.4	19.3	3.1	19.7	2.7
			TRM2	21.7	19.1	2.6	19.6	2.1
			TRM1	22.0	19.2	2.8	19.6	2.4
	CTR1	A2S	TRM5	18.9	18.0	0.9	18.4	0.5
			TRM4	18.5	17.2	1.3	17.7	0.8
			TRM3	17.8	16.0	1.8	16.4	1.4
			TRM2	17.1	15.1	2.0	15.5	1.6
			TRM1	16.8	14.4	2.4	14.8	2.0

Tabla 1. Temperaturas del Panel X1 [6]

Para obtener los resultados mostrados en las columnas verdes de la Tabla 1 se debieron degradar las PTO de todos los radiadores del CTR1 un 30%, las de los del CTR2 un 40%, las de los del CTR3 un 30% y las de los del CTR4 un 50%. De esta manera se obtienen las PTO mostradas en la Tabla 2.

				Emissivity values		Absorptivity values	
				8th level TMM	9Ath level TMM	8th level TMM	9Ath level TMM
X1	CTR 4	A3S	R1	0.378	0.371	0.067	0.112
			R2	0.458	0.450	0.082	0.136
			R3	0.650	0.628	0.115	0.192
			R4	0.780	0.767	0.140	0.232
			R5	0.493	0.484	0.088	0.147
	CTR 3	A3S	R1	0.378	0.374	0.067	0.094
			R2	0.458	0.453	0.082	0.115
			R3	0.650	0.633	0.115	0.161
			R4	0.780	0.772	0.140	0.195
			R5	0.657	0.650	0.117	0.164
	CTR 2	A2S	R1	0.458	0.452	0.082	0.125
			R2	0.378	0.372	0.067	0.103
			R3	0.824	0.812	0.147	0.225
			R4	0.780	0.769	0.140	0.214
			R5	0.575	0.567	0.103	0.157
	CTR1	A2S	R1	0.458	0.453	0.082	0.115
			R2	0.378	0.374	0.067	0.094
			R3	0.824	0.815	0.147	0.206
			R4	0.780	0.772	0.140	0.195
			R5	0.575	0.569	0.103	0.144

Tabla 2. Emisividad y Absortividad calculadas en el lanzamiento y un año después [6].

A continuación, la Tabla 3, se observan las degradaciones estimadas que las PTO experimentaron en todos los paneles entre los años 2018 y 2023 [6].

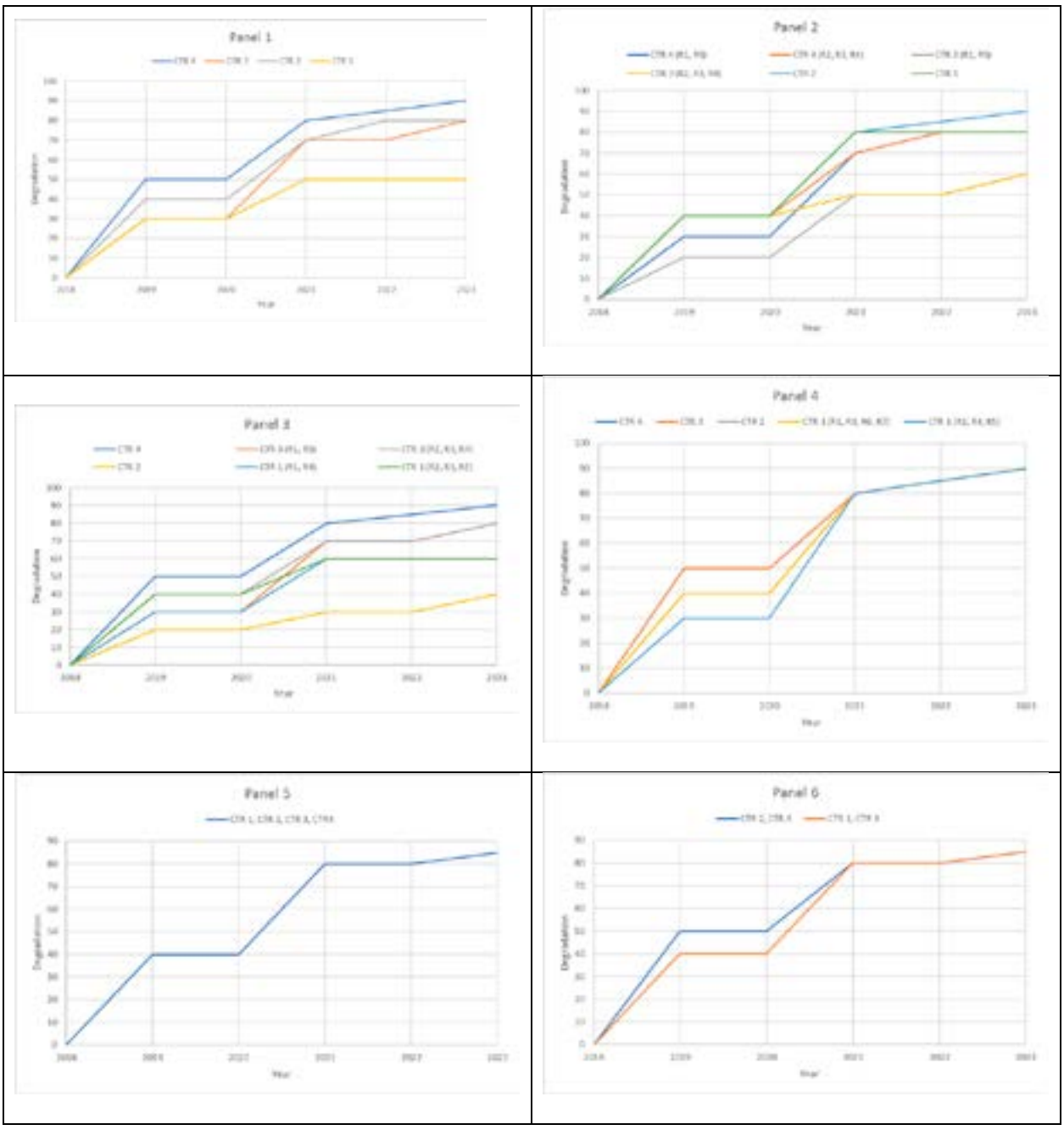




Tabla 3. Degradaciones estimadas de las PTO [6]

Análisis y Conclusiones

Podemos observar que, de acuerdo con la metodología empleada, la estimación de la degradación de las PTO a lo largo de cinco años va del 50% al 90%, en el panel X1. Sin embargo, al extender el análisis a todos los paneles observamos que la mayor parte de los radiadores se degradaron entre el 80% y el 90%. Esta estimación es acorde con la degradación prevista en el diseño, con un error del 10% hacia el lado de la seguridad. En base a esto y al correcto funcionamiento del satélite puede concluirse que el método empleado para esta estimación es adecuado y efectivo.

Bibliografía

[1] Spacecraft Thermal Control Handbook *– Second Edition - David G. Gilmore - American Institute of Aeronautics and Astronautics - ISBN 1-884989-11-X*

[2] Satellite Thermal Control for Systems Engineers *– Robert D. Karam – American Institute of Aeronautics and Astronautics – ISBN 1-56347-276-7*

[3] Spacecraft Systems Engineering *– Fourth Edition – Peter Fortescue et al. – Wiley – ISBN 9780470750124*

[4] Rocket Propulsion Elements *– Eighth Edition – George P. Sutton and Oscar Biblarz – Wiley – ISBN 978-0-470-08024-5*

[5] Fundamentals of Heat and Mass Transfer *– Eighth Edition – Frank P. Incropera – Wiley – ISBN* 978-1-119-35388-1

[6] Reportes Técnicos Propios del Proyecto *– Múltiples – ISBN 978-0-470-08024-5*

SISTEMA DE PROPULSIÓN DE CUBESAT PARA MANTENIMIENTO DE ÓRBITA.

Beron Guillermina, Mantelli Pablo, Ing. Delnero J. Sebastián.

UIDET – CTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Universidad Nacional de La Plata, Avenida 1 750, B1900 La Plata, Provincia de Buenos Aires.
guillerminaberon012@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de propulsión de satélites desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de órbitas y la ejecución de maniobras. Estos sistemas pueden clasificarse en distintos tipos según el principio que emplean para generar empuje, incluyendo propulsión química, eléctrica y térmica. La elección del sistema de propulsión depende de numerosos factores como la masa del satélite, la magnitud del ΔV requerido, las restricciones de espacio y energía disponibles a bordo.

Dentro de estos sistemas, la propulsión de gas frío es una de las alternativa más simples y confiables, especialmente para pequeños satélites como los CubeSats. Este tipo de propulsión se basa en la liberación controlada de un gas almacenado a alta presión a través de una tobera, generando empuje. Si bien su impulso específico es inferior al de otros sistemas de propulsión, su bajo costo y facilidad de integración lo convierten en la opción ideal para realizar maniobras orbitales poco demandantes.

El presente trabajo se centra en el desarrollo conceptual de un sistema de propulsión de gas frío para Cubesats, con el objetivo de mantener la órbita de un satélite y abrir una línea de investigación y desarrollo de tecnologías de propulsión dentro de la facultad. Se abordará el cálculo del el ΔV necesario, la estimación de la masa de propelente requerida y el diseño preliminar del sistema.

2. MARCO TEÓRICO Y DISEÑO.

En este trabajo se busca diseñar conceptualmente un sistema de propulsión de gas frío para el mantenimiento de órbita durante un año de un CubeSat de 6 unidades operando a una altitud de 500 km, típica para este tipo de satélites en órbitas bajas. La misión del sistema es compensar las perturbaciones orbitales, asegurando así la estabilidad de la trayectoria a lo largo del tiempo. Para ello, se calculará:

- El Delta ΔV necesario para el mantenimiento de órbita.
- La masa de propelente requerida en función del ΔV.
- El diseño preliminar del sistema.

El combustible seleccionado para este Sistema de Propulsión es el refrigerante R236fa, ya que es utilizado en numerosos módulos comerciales y presenta las siguientes características:

Propiedades del refrigerante R236fa	
Densidad de almacenaje líquido a temperatura de 15°C	$1397\ kg/m^3$
Densidad de almacenaje gaseoso a 15 bar y temperatura de 100°C	$99\ kg/m^3$
Masa molar	$152{,}04\ g/mol$
Coeficiente adiabático	$1{,}084$
Impulso específico a temperatura 100 °C	$49.76\ s$

Tabla 1: Propiedades de R236fa.

2.1. Mantenimiento de Órbita.

El mantenimiento de órbita es crucial para contrarrestar perturbaciones como el arrastre atmosférico, la presión de radiación solar y la gravedad no homogénea de la Tierra. En órbitas bajas, como 500 km, el principal factor de pérdida de altitud es el arrastre atmosférico, lo que exige correcciones periódicas mediante propulsión[1].

El mantenimiento de órbita requiere un menor consumo de propelente en comparación con maniobras más demandantes, como cambios de altitud o inclinación orbital. Es importante destacar que el sistema de propulsión propuesto no está diseñado para el control de actitud, por lo que no intervendrá en la estabilización o reorientación del CubeSat. Para este sistema, se decide realizar correcciones de órbita cada una semana para asegurar una altitud estable, este es un valor realista, aunque puede variar considerablemente dependiendo de la misión específica que se lleve a cabo.

2.2. Cálculo del ΔV Requerido

El ΔV necesario para mantener la órbita se obtuvo mediante simulaciones en GMAT (General Mission Analysis Tool). Estas simulaciones permiten modelar la dinámica orbital del CubeSat considerando las perturbaciones.

Para realizar la simulación, se introdujeron los parámetros orbitales completos correspondientes a una órbita de 500 km de altitud. Los datos de referencia de la órbita se obtuvieron a partir de los elementos TLE (Two-Line Elements) de un satélite actualmente operando en una órbita cercana a los 500 km de altura[2].

Se consideraron las características físicas del CubeSat, incluyendo el área frontal expuesta al arrastre atmosférico y la masa del satélite, correspondiente a un CubeSat de 6U.

A partir de la simulación, se obtiene el vector de velocidad en cada momento de la trayectoria del CubeSat. De esta manera, realizando la diferencia entre la velocidad inicial y final, se halló que el ΔV necesario para mantener la órbita es de alrededor de 19 m/s por año.

2.3. Estimación de la Masa de Propelente

A partir del ΔV, se calcula la cantidad de gas frío necesaria utilizando la ecuación del cohete de Tsiolkovsky[3]:

$$\Delta V = I_{sp}\, g_0 \ln\left(\frac{m_f + m_p}{m_f}\right)$$

Donde I_{sp} es el impulso específico del gas utilizado, g_0 es la aceleración gravitatoria, m_f es la masa final tras el consumo de propelente y m_p es la masa de propelente.

Conociendo el ΔV necesario, a partir de la fórmula mencionada se puede despejar la masa de propelente que el sistema de propulsión debe almacenar.

Además, otro parámetro que será de importancia en el diseño de la tobera es el impulso total, I_t[4], que se obtiene como:

$$I_t = m_p g_0 I_{sp}$$

Resultados de la propulsión	
Masa de propelente total	$0.458\ kg$
Masa de propelente por maniobra	$0.009\ kg$
Impulso Total	$223{,}62\ Ns$
Impulso Total por maniobra	$4{,}37\ Ns$

Tabla 2: Dimensiones de tanque de combustible líquido.

3. Diseño del Sistema de Propulsión

3.1. Requerimientos del Sistema

A Una vez determinada la masa de propelente se comienza con el diseño del sistema de propulsión. Para ello es fundamental establecer los requerimientos clave que debe cumplir:

- Ocupar un volumen máximo de 2 U dentro del CubeSat.
- Contener el propelente necesario para lograr el ΔV calculado.
- Generar un empuje controlado durante un determinado tiempo.

3.2 Tipo de propulsión.

El sistema de propulsión elegido es de gas frío y está diseñado para operar con dos fases del combustible: una en estado líquido y otra en estado gaseoso. Este sistema emplea dos tanques de combustible y un micro intercambiador de calor para lograr la conversión entre estos dos estados. El uso de almacenamiento tanto en estado líquido como gaseoso se basa en las ventajas específicas que cada fase ofrece.

El combustible líquido se emplea principalmente por su mayor densidad, lo que permite almacenar una mayor cantidad de propelente en un volumen reducido, un factor crucial en sistemas donde el espacio y la masa son limitados.

La conversión de propelente de estado líquido a gaseoso permite mejorar la eficiencia del sistema de propulsión, ya que al calentar el líquido para pasarlo a estado gaseoso, aumenta el impulso específico, Isp, y reduce la masa de propelente necesaria para un mismo empuje.

3.2. Diagrama Unifilar del Sistema

El sistema de propulsión se compone de diversos componentes diseñados para garantizar un suministro de gas preciso y eficiente hacia el propulsor. A continuación, se describe el funcionamiento general del sistema y la función de cada uno de sus elementos:

- Válvula de llenado (V1).
- Tanque de propelente en estado líquido presurizado.
- Transductor de Presión (P1).
- Termistor de Temperatura (T1).
- Válvula de aislación (V2).
- Micro intercambiador de calor (R1).

- Filtro (F1)
- Tanque de propelente en estado gaseoso.
- Transductor de Presión (P2).
- Termistor de Temperatura (T2).
- Propulsor (P1)

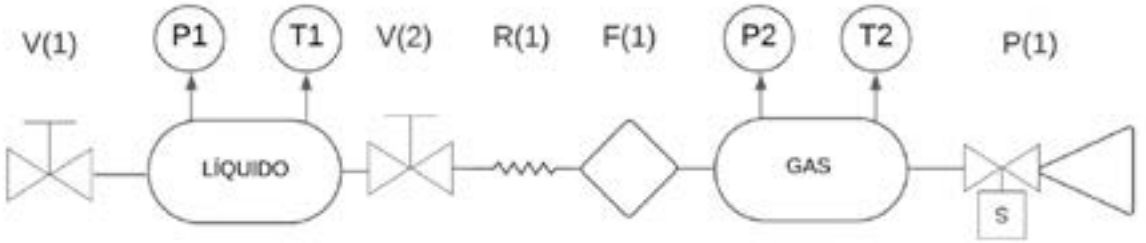


Ilustración 1: Sistema Unifilar de Sistema de propulsión.

El propelente se carga en el tanque a través de una válvula de llenado (V1), ubicada en una línea de llenado. Dentro del tanque, la temperatura y la presión del propelente se monitorean mediante un termistor (T1) y un transductor de presión (P1). Estos dispositivos convierten las mediciones físicas en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por un sistema de control electrónico.

A continuación, se encuentra una válvula (V2) que regula el paso desde el tanque de combustible líquido hacia el microintercambiador de calor R(1) que aumenta la temperatura del combustible para que este pase al estado gaseoso.

Junto al intercambiador de calor actúa un filtro (F1) que elimina pequeñas partículas que pueden dañar componentes o causar pequeñas pérdidas volumétricas.

La válvula de encendido y apagado del propulsor (P1) regula los pulsos de eyección de gas a través de la tobera. Estos dos componentes suelen estar integrados para optimizar el control y la respuesta del sistema.

3.2 Diseño del Tanque de combustible líquido.

Para el diseño del tanque de combustible líquido, se consideró que debe almacenar el combustible total necesario para el mantenimiento de órbita, según los cálculos previos. Se determinó que el tanque se mantendrá a una presión de 18 bares y una temperatura por debajo de 15 °C, asegurando que el refrigerante permanezca en estado líquido. La presión de 18 bares se establece para garantizar que el refrigerante pueda fluir hacia el tanque de almacenamiento gaseoso, que opera a 15 bares. Para lograr la presión deseada, el tanque líquido también almacena un gas ideal, en este caso, nitrógeno gaseoso.

A partir de estos valores de presión, se calculó el espesor necesario para que el tanque pueda soportar los esfuerzos generados por el combustible comprimido en su interior. Aplicando teoría membranal, con un factor de seguridad de 1,5, se determinó que el tanque requiere un espesor mínimo de 0,224 mm para soportar las condiciones de trabajo. Teniendo en cuenta el proceso de fabricación, se decidió seleccionar un espesor de 1 mm.

Diseño de tanque de combustible líquido	
Diámetro	$0{,}048\ m$
Espesor	$0{,}001 m$
Largo	$0{,}15\ m$
Volumen	$0.3287\ L$

Tabla 3: Dimensiones de tanque de combustible líquido.

3.3 Diseño del Tanque de combustible gaseoso.

Este tanque está conectado directamente a la válvula de propulsión, lo que significa que la salida del tanque representa los parámetros de entrada para el propulsor. Para garantizar que el sistema funcione correctamente durante todo el ciclo de operación, se debe mantener una masa fija dentro del tanque evitando que, a medida que el combustible se va agotando, la presión en el sistema disminuya.

Se estableció que la presión mínima de trabajo del tanque es de 7 bares asegurando que, incluso estado más desfavorable, el empuje generado por el propulsor sea adecuado. Entonces, cuando se realice una maniobra que requiera una corrección en el sistema, este tanque tendrá no solo la masa fija mencionada anteriormente, sino también la masa del propelente necesaria para realizar la corrección.

Teniendo en cuenta ambas masas y seleccionando un volumen similar al tanque líquido, se estableció que la presión máxima que debe soportar el tanque es de 15 bar. Es importante destacar que el propelente será almacenado a 100 °C en este tanque ya que bajo esa temperatura se mantiene en estado gaseoso en todo el rango de presiones que experimenta el tanque.

Considerando una presión de 15 bar, se obtuvo que el tanque gaseoso debe tener al menos un espesor de 0,154 mm.

Diseño de tanque de combustible gaseoso	
Diámetro	$0{,}0436\ m$
Espesor	$0{,}001\ m$
Largo	$0{,}15\ m$
Volumen	$0.268\ L$

Tabla 4: Dimensiones del tanque de combustible gaseoso.

3.3. Diseño de la Tobera

El objetivo principal de la tobera es generar el empuje necesario para realizar las correcciones de órbita. Para su diseño, se estableció una presión de entrada de 10 bares, que se encuentra dentro del rango de presión en el que el propelente es expulsado del tanque en estado gaseoso. Además, inicialmente se estableció que debía generar una fuerza de 1 N y se definió una presión de salida correspondiente a una altitud de 40 km. Esta presión de salida representa un compromiso entre el peso de la tobera y su rendimiento, ya que una presión más alta aumentaría el tamaño y peso de la tobera.

El diseño de la tobera se llevó a cabo bajo el supuesto de un flujo isoentrópico, es decir, sin considerar las pérdidas de energía[5]. A partir de los parámetros definidos se determinaron las dimensiones de la tobera.

Luego, se calculó la fuerza generada por la tobera en función del vaciado progresivo del tanque de combustible gaseoso. Este cálculo consideró la variación de la presión y la masa del gas a medida que se consumía el combustible. Para obtener el valor más representativo del rendimiento de la tobera, se promedió la fuerza durante todo el proceso de vaciado del tanque.

Finalmente, con el promedio de las fuerzas obtenidas, se determinó el tiempo necesario para que la tobera opere y genere el impulso total necesario para cada maniobra, el cual fue previamente calculado.

Diseño de Tobera	
Diámetro de entrada	$0.0017\ m$
Diámetro de garganta	$7.72\ x10^{-4}\ m$
Diámetro de Salida	$0.012\ m$
Empuje promedio	$1{,}103\ N$

Tabla 5: Diseño de tobera.

3.3. Diseño de la Válvula de Control

La válvula será de tipo axial, y contará con un solenoide que se encargará de regular el flujo del combustible hacia la tobera. El solenoide debe ser capaz de vencer la fuerza de presión sobre el área de presión, así como la fuerza del resorte que mantiene la válvula cerrada. Además, debe contemplarse el peso del tapón en el caso extremo donde la válvula esté acelerada.

No se tienen requerimientos estrictos en cuanto a la apertura, ya que estará funcionando aproximadamente 4 segundos por maniobra.

Además, la válvula debe ser capaz de soportar el caudal de la tobera, ya que esta regula el flujo del combustible hacia el propulsor.

3.5. Conclusiones.

A lo largo de este trabajo, se logró establecer de manera conceptual el sistema de propulsión de gas frío para el CubeSat, cumpliendo con los requerimientos definidos al inicio del proyecto. Se llevó a cabo tanto el diseño de los tanques de almacenamiento como el análisis de las condiciones de operación para determinar las presiones de trabajo y dimensiones adecuadas. Asimismo, se desarrolló la tobera para garantizar el cumplimiento de los parámetros de rendimiento establecidos, y se definió el diseño de la válvula de control considerando las fuerzas involucradas y las condiciones de operación extremas. El estudio realizado permitió establecer las bases de un diseño preliminar para un sistema de propulsión.

4. Bibliografía.

- [1]Vallado, D. A. (2013). Fundamentos de astrodinámica y aplicaciones (4.ª ed.). Microcosm Press.
- [2]Celestrak. (2025). TLE de [ZHANGHENG]. *Celestrak*. https://celestrak.org/satcat/tablesatcat.php?NAME=ZHANGHENG&PAYLOAD=1&MAX=500
- [3]Huzel, D. K., & Huang, D. H. (2017). *Fundamentals of rocket propulsion*. CRC Press.
- [4]Sutton, G. P. (2017). Elementos de propulsión de cohetes (9.ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- [5]White, F. M. (1999). Mecánica de fluidos (4.ª ed.). McGraw-Hill.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE GRUOSIDAD SUPERFICIAL EN SIMULACIONES RANS DE PERFILES AERODINÁMICOS

Juan M. Torres Zanardi, Valentina J. Marletta, Matías A. Herrera, Ana E. Scarabino y Federico A. Bacchi

Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, gfc@ing.unlp.edu.ar, http://www.gfc.ing.unlp.edu.ar

Resumen. Enmarcado en un proyecto de investigación que busca analizar el impacto aerodinámico de la rugosidad y la erosión en las palas de aerogeneradores, este estudio tiene como objetivo evaluar las predicciones y limitaciones de las simulaciones numéricas del tipo RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) en perfiles aerodinámicos con rugosidad superficial, comparando los resultados numéricos con resultados experimentales. Para ello, se llevan a cabo estudios numéricos del flujo turbulento sobre perfiles aerodinámicos laminares y no laminares, con rugosidad en el borde de ataque, a diferentes ángulos de ataque. El estudio incluye el análisis de los perfiles aerodinámicos NACA 63(3)-418, un perfil laminar utilizado en aerogeneradores, y el NACA 2418, un perfil no laminar con características geométricas similares al anterior. Las simulaciones, realizadas con el programa ANSYS Fluent, son del tipo RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) con el modelo de turbulencia *k-ω SST* (*Shear Stress Transport*) y la "Ley de la Pared Estándar" modificada para la rugosidad.

Palabras clave: turbulencia, capa límite, rugosidad, resistencia, CFD.

INTRODUCCION

La pérdida de eficiencia debido a la erosión de palas de generadores eólicos y la sedimentación sobre ellas puede llegar a valores tan extremos como el 50% [2,3]. La lluvia, granizo, insectos, arena, polvo y otras partículas transportadas por el viento impactan en las palas con velocidades relativas que llegan a los 200 km/h cuando la turbina se encuentra en operación [4]. La empresa EDP Renewables [5] inspecciono 201 palas en una granja eólica, encontrando que el 87% mostraban signos de erosión y el 50 %, signos de erosión severa en el borde de ataque.

Entre otros parámetros, la condición de la superficie de las palas del aerogenerador es crucial para su rendimiento, seguridad y eficiencia [6,7,8]. La condición de la superficie alrededor del borde de ataque juega un papel critico en las propiedades aerodinámicas y, por lo tanto, en la performance del aerogenerador. Debido al diseño de las palas y la naturaleza del flujo de aire los danos tienden a acumularse en el borde de ataque de la pala y se refiere frecuentemente como rugosidad en el borde de ataque (LER, por sus siglas en ingles *Leading Edge Roughness*).



Figura 1 - *Ejemplo de rugosidad en el borde de ataque (LER) de una pala de aerogenerador.*

La cuestión radica en el impacto que tiene una rugosidad determinada en el flujo de aire sobre un perfil aerodinámico. La rugosidad distribuida provoca un aumento en el espesor de la capa limite sobre la superficie rugosa, y su efecto suele ser una disminución de la sustentación, un aumento de la resistencia y una entrada en perdida prematura. Sin embargo, cuando la rugosidad de una superficie es menor que la subcapa laminar del flujo, se dice que es hidrodinámicamente suave y los cambios aerodinámicos son despreciables [9]. Por otro lado, en el régimen de rugosidad de transición, los elementos de rugosidad son ligeramente más gruesos que la subcapa viscosa y comienzan a perturbarla, mientras que en flujos totalmente rugosos la subcapa se destruye y los efectos viscosos se vuelve depreciable [10].

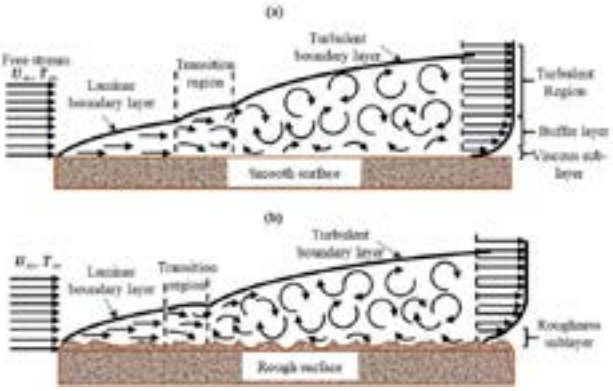


Figura 2 - *Capa Limite sobre una superficie lisa (a) y una con rugosidad (b) [1].*

En este marco, la simulación permite investigar de forma cualitativa estos efectos con mucha mayor versatilidad que realizando ensayos de campo o en túnel de viento. En particular, se modela la rugosidad de forma numérica, integrándola en las ecuaciones que resuelven el campo de flujo, para tener en cuenta su influencia, y así poder comparar con datos experimentales para validar sus resultados.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo una serie de simulaciones numéricas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) con el software *ANSYS*, mediante el solver *Fluent*, y las herramientas de modelado de geometría y mallado, *Design Modeler* y *Ansys Meshing*, respectivamente.

Se realizaron simulaciones para un flujo turbulento sobre una placa plana lisa de longitud *L=50m* con diferentes modelos de turbulencia y realizando un estudio de convergencia de malla. Se probaron otras longitudes, pero la mencionada resultó la más práctica porque se abarca la mayor cantidad de números de Reynolds sin llegar a velocidades extremadamente altas.

En base al análisis anterior, se simuló un flujo de capa límite turbulenta desde el inicio, sobre la misma placa, pero con diferentes valores de rugosidad uniforme de escala de grano de arena nominal *Ks,* variando el número de Reynolds para un valor de rugosidad relativa *ks/L* fijo. Estos resultados se compararon con las curvas del coeficiente de resistencia total (*Cd*) en función del número de Reynolds, propuestas por Schlichting y Prandtl [9], a partir de los resultados obtenidos por Nikuradse con tubos enarenados.

Una vez validado el modelo de rugosidad, se llevó a cabo el modelado y mallado para un perfil NACA-2418 para ángulos de ataque de -14º a 21º, el cual es el rango donde se tienen datos experimentales para comparar los resultados. Se realizó para un *Re=5.800.000*, que se obtuvo a partir de un valor de cuerda *c=1m*, densidad del fluido *ρ=1kg/m³,* velocidad *V=1 m/s* y la viscosidad μ de forma que cumpla el valor de Reynolds.

El perfil se evaluó sin rugosidad y con la “rugosidad estándar” contra los resultados experimentales reportados por NACA. Según el reporte NACA no. 842 la *rugosidad estándar,*

"*…consiste en granos de carborundo de 0.011 pulgadas (0.2794 mm) aplicados a la superficie del perfil alar en el borde de ataque, sobre una longitud de 0.08c medida desde el borde de ataque en ambas superficies. Los granos están distribuidos de forma que cubren entre el 5 y el 10 por ciento de esta área*".

La nueva extensión del modelo de turbulencia k-ω utiliza la altura equivalente del grano de arena (kr) para incluir el efecto de la rugosidad superficial. Sin embargo, como ya señaló Schlichting, la definición de k_r no está directamente ligada a la rugosidad geométrica de la superficie. Por ello, se han propuesto diversas correlaciones para predecir k_r a partir de las características geométricas de la superficie, tal y como se analiza en las revisiones de Bons y de Flack y Schultz. No obstante, ninguna correlación individual parece predecir con precisión todas las topografías superficiales.
En particular para la rugosidad distribuida, Flack y Schultz (2004) investigaron la correlación entre la altura equivalente k_r, determinada experimentalmente en un túnel de viento, y los parámetros de la topografía superficial de varios tipos de superficies, incluyendo el papel de lija. Al estudiar numéricamente diversas formas funcionales, propusieron la siguiente ley de potencias que relaciona k_r y dos parámetros de la rugosidad superficial Sq y Ssk.

$$k_r = 4,43 \cdot S_q \cdot \left(1 + S_{sk}\right)^{1,37}$$

Donde, la rugosidad cuadrática media (Sq) es la media cuadrática de las alturas de las irregularidades de la superficie, y la asimetría (Ssk) es una medida de la distribución de las alturas de las irregularidades de la superficie.
Kruse et al. (2020) utilizó microscopía confocal para caracterizar la topografía superficial de varios granos de lijas. En la Tabla 1 se muestran los parámetros Sq y Ssk medidos por Kruse, el diámetro medio de grano y la rugosidad equivalente de acuerdo con Flack y Schultz (2010) junto con el valor de rugosidad equivalente k_r estimado para la rugosidad estándar mediante el ajuste propuesto por Kruse.

Tabla 1 - caracterización superficial de varios granos de lijas por Kruse et al.

Tamaño de grano (-)		P40	STD	P60	P80	P100	P120	P180	P240
Diámetro medio de grano (µm)		425	279.4	269	201	162	125	82	53
Rugosidad cuadrática media (µm)	Sq	142	-	88	62	53	42	28	23
Asimetría (-)	Ssk	1.01	0.1	0.92	1.07	0.71	0.62	0.51	0.4
Rugosidad equivalente (µm)	kr	1637	**994.6***	955	741	492	357	216	152

* estimación por medio del ajuste propuesto por Kruse et al.

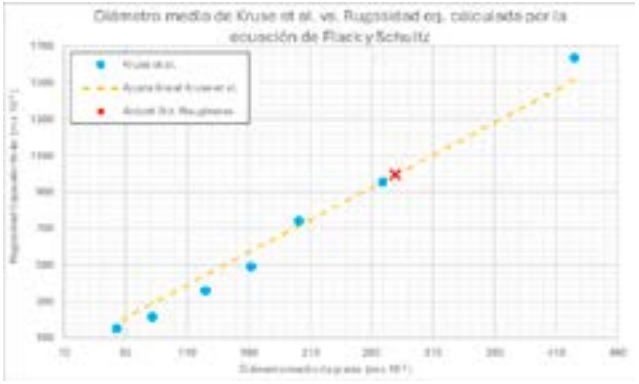


Figura 3 – Diámetro medio vs. Rugosidad equivalente por Kruse et al.

CONFIGURACIÓN NUMÉRICA

Las simulaciones son en dos dimensiones, estacionarias, del tipo RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) con modelo de turbulencia *k-ω SST (Shear Stress Transport)* desarrollado por Menter. Las ecuaciones son resueltas con el algoritmo SIMPLE y los términos

convectivos son discretizados con el esquema QUICK. No se presentaron problemas de convergencia en las simulaciones, bajo el criterio para los residuos de 1*10^-6.
El modelo de turbulencia utilizado posee una extensión para tener en cuenta la rugosidad superficial [10]. Para esto se definen dos parámetros para caracterizar la rugosidad: la altura de rugosidad equivalente Ks, y una constante Cs que depende del tipo de rugosidad y que, por lo general, se utiliza por defecto un valor de 0.5.
Según el modelo utilizado, se recomienda que él y+ sea por lo menos menor a 1. Para este caso se sobredimensionó para obtener un y+ menor a 0.3.

DOMINIO Y MALLADO

Para el perfil se planteó un dominio tipo C, con un radio de 12.5m y una extensión lateral de 20m respecto al borde de fuga, como se muestra en la *Error! Reference source not found.*. Sobre el borde circular y los laterales superior e inferior se impone una condición de velocidad de entrada, variable en dirección según el ángulo de ataque. En el borde izquierdo se plantea una condición de presión atmosférica de salida, mientras que sobre el perfil se tiene una condición de pared.

Para la mallado se planteó una malla no estructurada, para tener mayor independencia en el alineamiento de los elementos respecto a la dirección del flujo. Se cubrió el perfil con aproximadamente 400 elementos tanto en intradós como en extradós, refinando aún más en la zona del borde de ataque y el borde de fuga. Se creó un “Inflation” para poder asegurar que el primer elemento cumpla con el requisito de y+ planteado. Por último, se creó un cuerpo de influencia alrededor del perfil, con la capacidad de rotar para cada ángulo de ataque, alineándose con la dirección del flujo para así poder capturar la estela del perfil con mayor precisión. Este se extiende un tamaño de tres veces la cuerda hacia atrás, respecto al borde de ataque y con un arco de influencia de 30º. La malla resultante contiene alrededor de 96200 elementos.

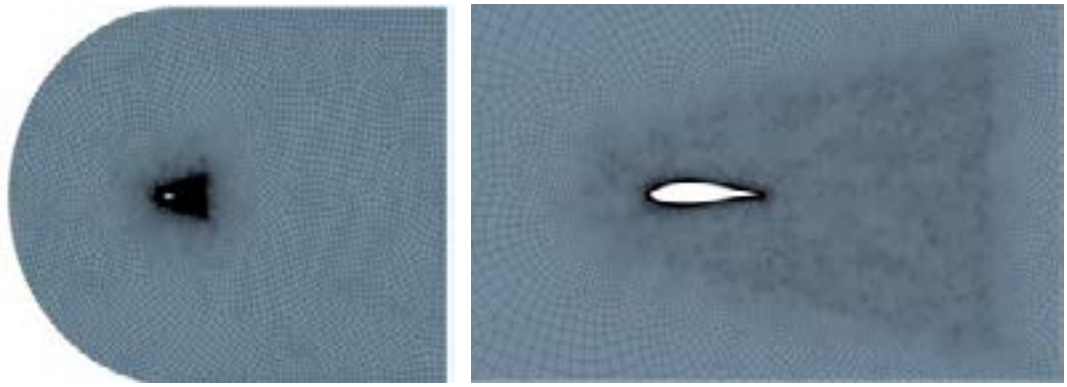


Figura 4 – Mallado del dominio total y el cuerpo de influencia.

RESULTADOS

Curva del perfil limpio

Comparación de las curvas numéricas y de Abbott (experimentales) de sustentación y arrastre para el perfil NACA-2418 liso con Reynolds de 5.8e6.

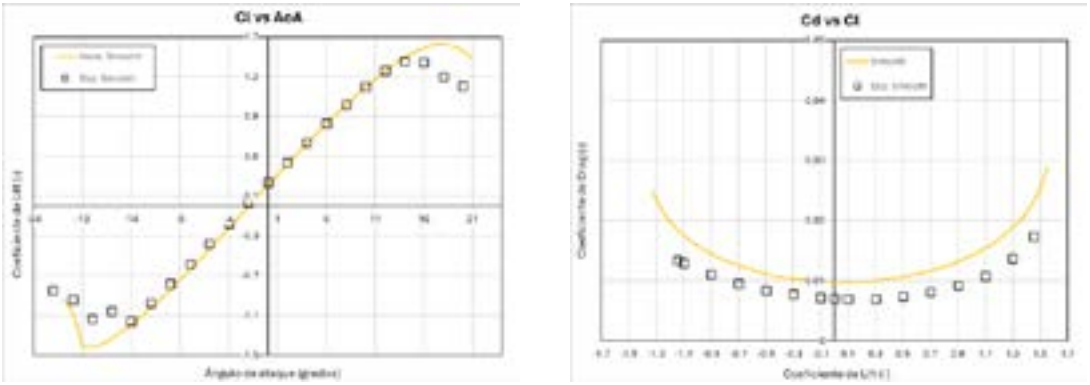


Figura 5 – Curvas Cl-alfa y curvas Cd-Cl del perfil NACA-2418 liso para Reynolds 5.8e6.

Curva del perfil con rugosidad estándar

Comparación de las curvas numéricas y de Abbott (experimentales) de sustentación y arrastre para el perfil NACA-2418 con rugosidad estándar de Abbott para un Reynolds de 5.8e6.

El modelo de rugosidad usado es el "*Standard Law-of-the-Wall Modified for Roughness*" de ANSYS Fluent. En este modelo el usuario puede ajustar dos parámetros, la altura de rugosidad (K_s) y una constante de rugosidad (C_s). Para K_s, se usó la altura equivalente del grano de arena (k_r), calculada anteriormente y para C_s se usó un valor de 0.5, valor por defecto sugerido por ANSYS. Entonces tenemos $K_s = 994.6 \times 10^{-6}\ m$ y $C_s = 0.5$.

Las Figura 6 y **Error! Reference source not found.** muestran las curvas de Cl-alfa y Cl-Cd respectivamente, donde se comparan los resultados numéricos contra los resultados experimentales de Abbott.

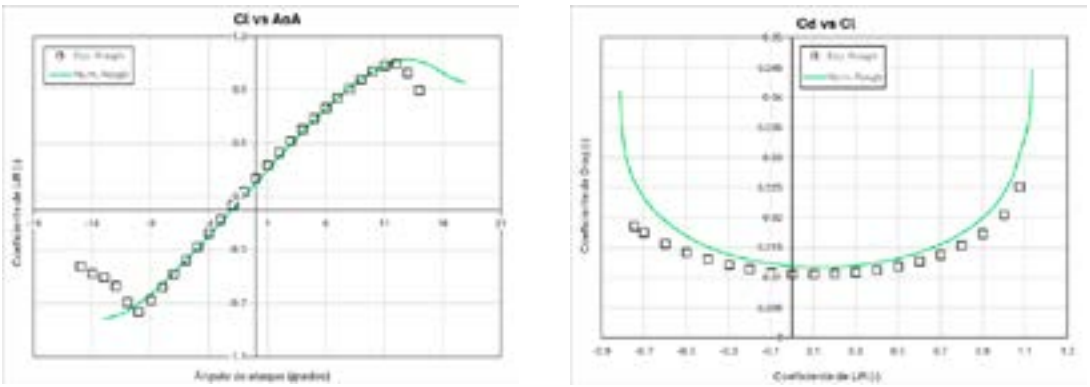


Figura 6 – Curvas Cl-alfa y curvas Cd-Cl del perfil NACA-2418 con rugosidad estándar para Reynolds 5.8e6.

Análisis de sensibilidad del modelo de rugosidad al parámetro Ks.

Tomando como centro los valores usados para la rugosidad estándar, se hizo variar K_s y C_s de forma que el parámetro toma el valor estándar, un valor 50% debajo del estándar y un valor 50% arriba del estándar. Por otro lado, el valor de C_s se mantiene constante, pues en el modelo de rugosidad estos parámetros están multiplicado entre sí. En la Tabla 2 se muestran las denominaciones asignadas a cada caso evaluado.

Tabla 2 – Nombres de los casos evaluados al variar K_s y C_s.

$K_s = 0.5 \cdot k_r$ $(497.3 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.0 \cdot k_r$ $(994.6 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.5 \cdot k_r$ $(1491.9 \times 10^{-6}\ m)$
0.5_STD_0.5	1.0_STD_0.5	1.5_STD_0.5

En la Figura 7 se muestran las curvas de Cl-alfa y Cl-Cd respectivamente, donde se comparan los resultados numéricos con variación de K_s y C_s constante.

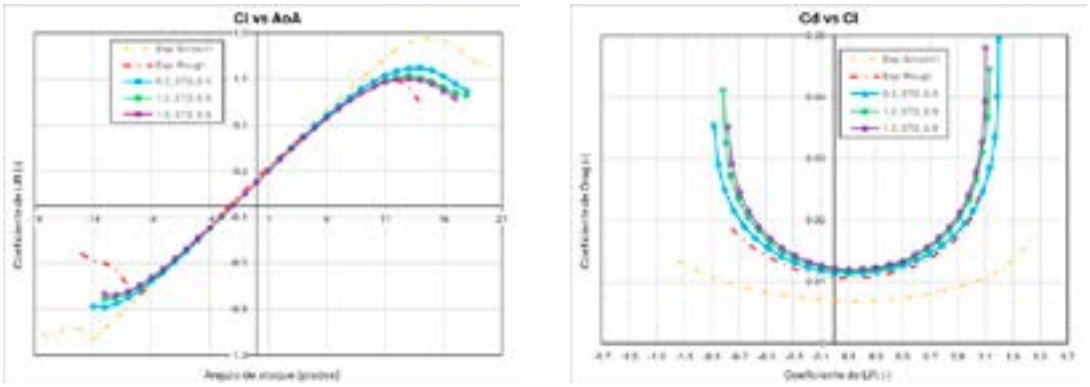


Figura 7 – Curvas Cl-alfa y Cd-Cl con variación de K_s y $C_s = 0.5$ constante.

De las figuras y la Tabla 3 vemos que la curva CL-alfa, que mejor copia la curva experimental es la correspondiente a $K_s = 1.5 \cdot k_r$. Mientras que la curva CD-CL, que más se acerca a los resultados experimentales es la correspondiente a $K_s = 0.5 \cdot k_r$.

Tabla 3 – Error porcentual del Cl máximo respecto al resultado experimental.

$K_s = 0.5 \cdot k_r$ $(497.3 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.0 \cdot k_r$ $(994.6 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.5 \cdot k_r$ $(1491.9 \times 10^{-6}\ m)$
9.1%	3.2%	**0.5%**

Tabla 4 – Error porcentual del Cd mínimo respecto al resultado experimental.

$K_s = 0.5 \cdot k_r$ $(497.3 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.0 \cdot k_r$ $(994.6 \times 10^{-6}\ m)$	$K_s = 1.5 \cdot k_r$ $(1491.9 \times 10^{-6}\ m)$
6.56%	10.72%	12.73%

CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido evaluar la capacidad predictiva del modelo de rugosidad superficial implementado en simulaciones RANS para perfiles aerodinámicos, específicamente para el NACA-2418. Las principales conclusiones obtenidas son:

1. **Validación del modelo numérico**: Las simulaciones CFD con el modelo de turbulencia k-ω SST y la "Ley de la Pared Estándar" modificada para rugosidad han demostrado ser capaces de reproducir las tendencias observadas experimentalmente en perfiles con rugosidad superficial, aunque con ciertas limitaciones.
2. **Predicción de coeficientes aerodinámicos**: Para el perfil NACA-2418 sin rugosidad, el modelo numérico reproduce con buena precisión las curvas de sustentación (Cl-alfa) pero sobreestima la resistencia (Cd-Cl) obtenidas experimentalmente por Abbott en el rango de ángulos de ataque analizado (-14° a 21°).
3. **Sensibilidad al parámetro Ks**: El análisis de sensibilidad ha revelado que la elección del parámetro de altura de rugosidad equivalente (Ks) tiene un impacto significativo en los resultados:
   - Para la predicción del coeficiente de sustentación máximo, el valor de Ks 50% superior al estándar presenta el menor error respecto a los datos experimentales.
   - Para el coeficiente de resistencia mínimo, el menor error respecto a los datos experimentales lo ofrece el valor de Ks 50% menor al estándar.

- Esta discrepancia parecería indicar que un único valor de Ks no puede predecir simultáneamente con la misma precisión todos los parámetros aerodinámicos.

La sensibilidad al parámetro Ks requiere un estudio más profundo. Aún no es posible determinar si la discrepancia mencionada anteriormente constituye un aspecto intrínseco del modelo de rugosidad o si existen otros factores externos que la originen. Por ejemplo, todo el modelo numérico, y particularmente el modelo de turbulencia, necesita un análisis más exhaustivo, ya que en los ensayos sin rugosidad se observa la misma tendencia a sobreestimar la resistencia.

REFERENCIAS

1. M. Kadivar, D. Tormey, G. McGranaghan: A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories, International Journal of Thermofluids, 2021. Vol 10.
2. M. Khalfallah and A. Koliub: Effect of dust on the performance of wind turbines; The Ninth Arab International Conference on Solar Energy (AICSE-9), Kingdom of Bahrain, Elsevier Desalination, 2007, Vol 209, Issues 1-3, pages 209-220.
3. L. Deshun, L. Rennian, Y. Congxin and W. Xiuyong: Effects of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil; Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010.
4. H. Law and V. Koutsos: Leading edge erosion of wind turbines: Effect of solid airborne particles and rain on operational wind farms; Wind Energy, 2020.
5. A.H. Sierra and E.G. Perez: Wind farm owner's view on rotor blades: from O&M to design requirements; International Conference Wind Turbines Rotor Blade O&M, 2013.
6. A. Sareen, C.A. Sapre and M.S. Selig: Effects of leading-edge erosion on wind turbine blade performance; Wind Energy, 2014.
7. R. van Rooij and W.A. Timmer: Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils; J Solar Energy Eng Trans ASME, 2003, 125, pp 468-478.
8. R.W. Hooker: The aerodynamic characteristics of airfoils as affected by surface roughness; NACA-TN-457 Langley Memorial Aeronautical Laboratory; 1933.
9. H. Schlichting; “Teoria de la Capa Limite”; 1951, Ed. Urmo.
10. F. Menter: Development of a rough wall boundary condition for ω-based turbulence models; ANSYS Technical Report, 2004.
11. E.K. Kruse, N. Sorensen, C. Bak and M.S. Nielsen: CFD simulations and evaluation of applicability of a wall roughness model applied on a NACA 633-418 airfoil; Wind Energy, 2020, pp 1–12.
12. E.K. Kruse, C. Bak and A.S Olsen: Wind tunnel experiments on a NACA 633-418 airfoil with different types of leading-edge roughness; Wind Energy, 2021.
13. K.A. Flack and M.P. Schultz: Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime; J Fluids Eng., 2010.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRANSICIÓN COMBINADO CON RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN SIMULACIONES RANS DE PLACAS PLANAS Y CILINDROS

Autores: De Urraza Alexis, Torres Zanardi Juan Manuel, Scarabino Ana, Bacchi Federico

CTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata, Avenida 1 750, B1900 La Plata, Provincia de Buenos Aires.

alexis.urraza@alu.ing.unlp.edu.ar
gfc@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, se analizará la validez de las simulaciones RANS en ANSYS Fluent realizadas con el modelo de transición γ-*Transport Equation* para determinar la transición de la capa límite laminar a turbulenta y las fuerzas generadas sobre los cuerpos bajo análisis. Se realizarán simulaciones numéricas sobre dos cuerpos de estudio: (1) una placa plana y (2) un cilindro. Ambos cuerpos contarán con diferentes niveles de rugosidad superficial y se compararán los resultados obtenidos por las simulaciones con resultados obtenidos por estudios experimentales previos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS PRELIMINAR

En esta sección, se presentarán los resultados experimentales previos sobre los cuales se definirán las condiciones de cada una de las simulaciones. Luego, se hará un breve resumen de la teoría detrás del *solver* y, por último, se presentarán las conclusiones de un análisis de sensibilidad de malla realizado para dichas simulaciones.

RESULTADOS EXPERIMENTALES PREVIOS

Las simulaciones que se realizarán en este trabajo están basadas en dos estudios de referencia: el primero, el cual presenta resultados experimentales sobre placas planas con rugosidad superficial, es *Teoría de la capa límite* de *H. Schlichting*, específicamente en la sección de *Capa límite turbulenta bajo presión uniforme* [1]*, pero también su sección sobre transición de la capa límite laminar a turbulenta* [2]. El segundo estudio de referencia, el cual presenta resultados experimentales sobre cilindros con rugosidad superficial, es *Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder* de *E. Achenbach* [3] y, además, su trabajo anterior donde se describen las condiciones de los experimentos [4]. Este trabajo se enfocará, principalmente, en la distribución del coeficiente de fricción superficial sobre el cuerpo y en la predicción de la transición que dichas curvas brinden.

CONFIGURACIÓN DEL SOLVER

Para el análisis de la placa plana con rugosidad superficial, es factible la realización de simulaciones 2D estacionarias sobre la misma. Sin embargo, para el análisis del cilindro con rugosidad superficial será necesario realizar simulaciones 2D no estacionarias, debido a los desprendimientos periódicos del flujo sobre el cilindro.

Para las simulaciones, se resolverán las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) en dos dimensiones:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)$$

Donde las velocidades y las demás variables se encuentran promediadas en el tiempo, no son los valores instantáneos de las mismas. Los modelos de turbulencia basados en estas ecuaciones realizan un tratamiento adicional para resolver el tensor de tensiones a partir de la hipótesis de Boussinesq.

Con esta hipótesis, se introduce la variable μ_t, conocida como viscosidad turbulenta, la cual cada modelo de turbulencia la resuelve de una manera distinta. En este caso, el modelo de turbulencia a utilizar es el mismo para ambos análisis. Se utilizará el modelo de turbulencia k-ω SST con el modelo de transición γ-*Transport Equation*. Este modelo de turbulencia resuelve la viscosidad turbulenta a partir de la introducción de dos variables conocidas como *energía cinética de la turbulencia k* y *tasa específica de disipación de la turbulencia* ω. La ventaja que presenta el modelo k-ω sobre los demás modelos de turbulencia (como, por ejemplo, k-ε) es que resuelve el flujo cercano a la pared, la subcapa viscosa. Como la misma se ve afectada por la rugosidad superficial del cuerpo y se busca analizar la transición de la capa límite, se vuelve necesario un modelo que resuelva dicha zona. Por el lado de las diferentes variantes del modelo k-ω, la variante SST presenta la ventaja de que predice de una mejor manera las tensiones de corte sobre la superficie y, además, se han implementado mejoras que tienden a robustecer el modelo.

En cuanto a la discretización espacial y temporal a utilizar, se utilizará una discretización de segundo orden *upwind* para las ecuaciones de presión, de cantidad de movimiento y las ecuaciones de la energía cinética de la turbulencia y tasa específica de disipación de la turbulencia, mientras que para la discretización temporal (en el análisis del cilindro) se utilizará una discretización de primer orden implícita. En cuanto al método de resolución de las ecuaciones, se utilizará un método SIMPLE, el cual utiliza una menor cantidad de memoria y tarda menos por iteración, aunque su tiempo de convergencia sea mayor que un COUPLED.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA

El análisis de sensibilidad de malla se basa principalmente en la influencia de aumentar la cantidad de elementos normales a la superficie y la cantidad de elementos a lo largo de la misma, además de analizar el efecto de reducir el valor del parámetro y^+. El modelo de turbulencia seleccionado requiere una buena resolución de la malla en la zona cercana a la pared, donde será necesario un valor de $y^+ \simeq 1$ o menor. Según análisis previos presentados en los manuales de ANSYS Fluent, se logran resultados aceptables con valores de y^+ de 1 o menores, donde ya la solución deja de variar sustancialmente al seguir refinando la malla. Por el lado de la influencia de la cantidad de elementos sobre la superficie, no hay un parámetro adimensional a analizar, se determinará a partir del análisis de la variación de la solución.

PLACA PLANA

En el caso de la placa plana, en primer lugar, se ha buscado determinar la altura del primer elemento necesaria para que el valor del parámetro y^+ se encuentre por debajo de 1. Entonces, se ha realizado el análisis de la sensibilidad de la solución a la cantidad de elementos a lo largo de la placa. Luego, se procede a realizar un análisis de la sensibilidad de la solución al valor del parámetro y^+.

Malla	NEL	y^+ AWA [-]	Dif. [%]	τ_W AWA [Pa]	Dif. [%]
Malla 1	100	0.5326	-	0.7569	-
Malla 2	200	0.4928	7.47	0.6719	11.23
Malla 3	400	0.3770	23.50	0.6586	1.98
Malla 4	800	0.3760	0.28	0.6559	0.42

Tabla 1: análisis de malla para la placa plana, cantidad de elementos a lo largo de la placa. AWA significa Area-Weighted Average.

A partir de estos resultados, se puede observar que la cantidad óptima de elementos sobre la placa plana es de 400, dado que seguir aumentando la misma no redunda en una mejora significativa de los resultados. Por otro lado, se analizará el efecto de refinar la malla en cuanto a altura del primer elemento:

Malla	y^+ AWA [-]	τ_W AWA [Pa]	Dif. [%]
Malla 3	0.3770	0.6586	-
Malla 5	0.2431	0.6576	0.15
Malla 6	0.1215	0.6571	0.9

Tabla 2: análisis de malla para la placa plana, valor del parámetro y+.

A partir de estos resultados, podemos observar que los resultados no varían sustancialmente al modificar el valor del parámetro y^+. Como conclusión del análisis de sensibilidad, se utilizará una malla con 400 elementos junto con una altura del primer elemento de 2e-2mm, por lo que el valor del parámetro y^+, en este caso, será de 0.38.

CILINDRO

En el caso del cilindro, se han propuesto las siguientes mallas, y se ha analizado la diferencia relativa entre las diferentes soluciones para saber hasta dónde es necesario refinar:

Malla	NER	NEC	NE
Malla 1	95	360	35.550
Malla 2	95	720	71.100
Malla 3	165	360	62.820
Malla 4	130	360	49.500

Tabla 3: mallas analizadas para el cilindro. NER significa número de elementos normales (radiales), NEC se refiere a número de elementos sobre la circunferencia y NE es el número de elementos totales en la malla.

En primer lugar, se ha analizado la influencia de la cantidad de elementos sobre la circunferencia, con un valor del parámetro $y^+ = 0.92$:

Malla	NEC	$\overline{C_D}$	Dif. [%]	$C_{L,rms}$	Dif. [%]	$\tau_{w,max}\ [Pa]$	Dif. [%]
Malla 1	360	0.98	-	0.62	-	4.84	-
Malla 2	720	0.95	3.32	0.57	8.21	4.70	2.89

Tabla 4: análisis de malla para el cilindro, cantidad de elementos sobre la superficie.

En segundo lugar, se ha analizado la influencia de la cantidad de elementos normales a la superficie, incluyendo una mayor resolución de la malla:

Malla	NER	$\overline{C_D}$	Dif. [%]	$C_{L,rms}$	Dif. [%]	$\tau_{w,max}$ [Pa]	y^+
Malla 1	95	0.98	-	0.62	-	4.84	0.92
Malla 4	130	1.08	9.93	0.77	23.80	4.86	0.46
Malla 3	165	1.14	5.89	0.81	5.43	4.85	0.46

Tabla 5: análisis de malla para el cilindro, cantidad de elementos normales a la superficie y altura adimensional de pared.

Como se puede observar, un aumento de la cantidad de elementos sobre la superficie del cilindro de 360 a 720, aumenta la cantidad de elementos en la malla desde los 35.550 hasta los 71.100, pero la diferencia relativa en los resultados es menor al 5% en general. Por el lado del valor del parámetro y^+, al refinar la malla reduciendo a la mitad la altura adimensional de pared se consigue un cambio importante en los valores de los parámetros a analizar. Luego, si se refina aún más la cantidad de elementos normales, el cambio no resulta muy importante. Entonces, se determina utilizar la malla 4 para reducir el costo computacional sin incurrir en un error importante.

RESULTADOS

En esta sección presentaremos los resultados obtenidos para el caso del cilindro con rugosidad y de la placa plana.

PLACA PLANA

En el caso de la placa plana, el análisis se basará en la comparación de la distribución del coeficiente de fricción superficial sobre la superficie de la placa plana con los resultados experimentales. Las simulaciones se han realizado para dos niveles de rugosidad superficial que pueden compararse con resultados experimentales previos. Si bien el estudio de referencia no presenta curvas del coeficiente de fricción superficial para transición en placa plana con rugosidad, sí ofrece curvas experimentales del coeficiente de fricción para capa límite completamente turbulenta [1]. De esta manera, junto con otros estudios de referencia dentro del libro que indican las condiciones en las cuales se ha medido la transición y el punto donde transiciona la capa límite [2], se puede inferir si la predicción que realiza ANSYS Fluent sobre la transición es válida tanto cualitativa como cuantitativamente.

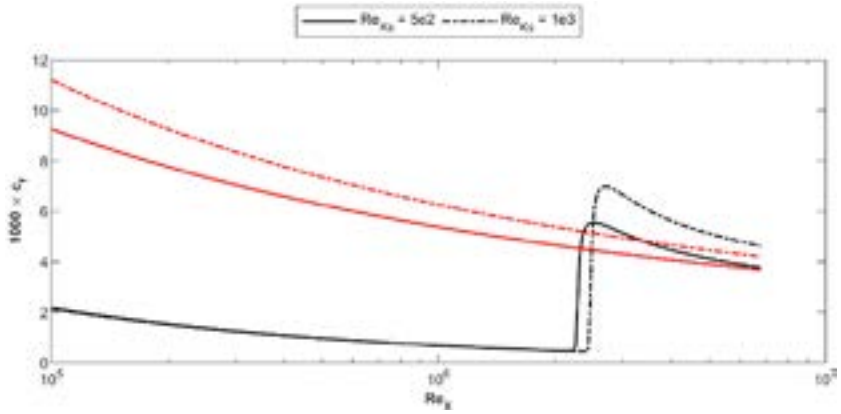


Gráfico 1: comparación de las curvas del coeficiente de fricción local obtenidas por ANSYS Fluent (en negro) con las obtenidas experimentalmente y presentadas en Schlichting (en rojo).

En primer lugar, se puede observar que las curvas del coeficiente de fricción local obtenidas por ANSYS Fluent convergen a las curvas del coeficiente de fricción local para una capa límite completamente turbulenta obtenidas experimentalmente por Schlichting [1]. Por otro lado, también puede apreciarse que el punto donde ocurre la transición se encuentra alrededor de un $Re_x = 2 \times 10^6$. Según Schlichting, el Reynolds crítico para placas planas

con un bajo nivel de turbulencia se encuentra aproximadamente en 2.8e6 [2], por lo cual los resultados obtenidos en esta simulación se condicen con los experimentos previos.

CILINDRO

En el caso del cilindro con rugosidad, el análisis se basará en comparar las curvas de distribución del coeficiente de fricción superficial sobre el cilindro obtenidas por las simulaciones con las obtenidas experimentalmente. Se analizarán, entonces, dos condiciones de rugosidad superficial, debido a que el estudio de referencia presenta curvas de distribución del coeficiente de presiones y del coeficiente de fricción superficial para únicamente dos niveles de rugosidad: $K_s/D = 1.1 \times 10^{-3}$ y $K_s/D = 4.5 \times 10^{-3}$.

$K_s/D = 1.1 \times 10^{-3}$		$K_s/D = 4.5 \times 10^{-3}$	
Re [-]	**U [m/s]**	**Re [-]**	**U [m/s]**
4.70×10^4	5.91	4.15×10^4	5.21
8.42×10^4	10.58	7.04×10^4	8.85
1.52×10^5	19.07	8.37×10^4	10.52
2.08×10^5	26.14	1.34×10^5	16.83
2.44×10^5	30.70	1.70×10^5	21.38
-	-	2.47×10^5	31.07

Tabla 6: condiciones de flujo analizadas para el cilindro con rugosidad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el primer nivel de rugosidad, evaluando diferentes condiciones de número de Reynolds. Como se puede observar, no puede apreciarse ningún punto donde pueda inferirse una transición de la capa límite.

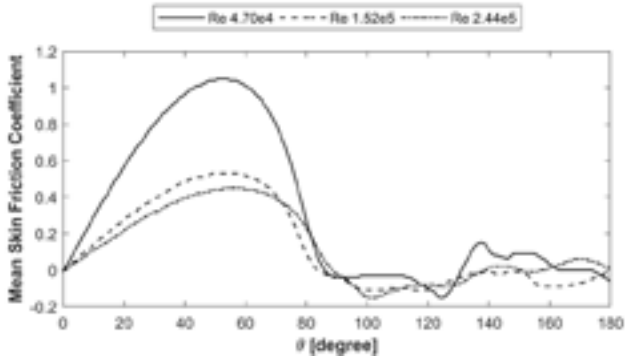


Gráfico 2: distribución del coeficiente de fricción superficial promediado en el tiempo, para el nivel de rugosidad más bajo, para diferentes condiciones de número de Reynolds del flujo. Puede observarse que no se encuentra un punto de transición.

Si comparamos esta distribución con los resultados experimentales, podemos ver que los resultados difieren, principalmente en que experimentalmente se detectó una transición.

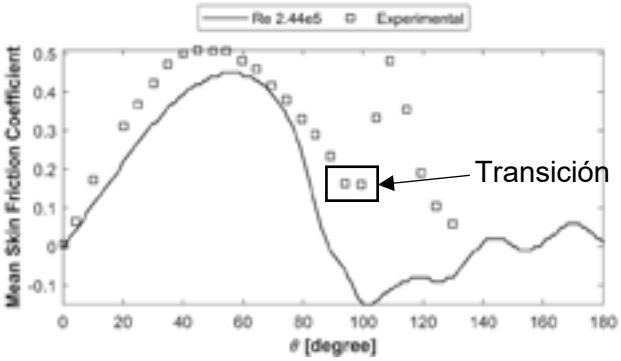


Gráfico 3: comparación entre la distribución del coeficiente de fricción superficial obtenida por las simulaciones versus la distribución obtenida experimentalmente, para el primer nivel de rugosidad.

Si se realiza el mismo procedimiento para el nivel de rugosidad más alto, ocurre algo similar.

CONCLUSIÓN

A partir del análisis, se obtienen conclusiones diferentes para cada caso. En primer lugar, para el análisis sobre la placa plana con rugosidad superficial, debido a que se trata de un caso sencillo y calibrado, los resultados de las simulaciones coinciden con los resultados experimentales previos. Sin embargo, para el caso del cilindro con rugosidad superficial, el modelo de transición utilizado no predice correctamente la transición sobre la superficie del cilindro. Esto puede deberse a que, como se indica en el manual de teoría de ANSYS [5], el modelo de transición γ-*Transport Equation* no presenta una correlación para el nivel de rugosidad superficial. Entonces, podrían esperarse grandes discrepancias en estos resultados. Por lo tanto, no es recomendable combinar este modelo de transición con problemas que requieran introducir rugosidad superficial.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Schlichting, «Capa límite turbulenta bajo presión uniforme,» de *Teoría de la capa límite*, Bilbao, Ediciones Urmo, 1972, pp. 633-636.

[2] H. Schlichting, «Nacimiento de la turbulencia I,» de *Teoría de la capa límite*, Bilbao, Ediciones Urmo, 1972, pp. 476-478.

[3] E. Achenbach, «Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder,» *Journal of Fluid Machanichs,* vol. 46, nº 2, pp. 321-335, 1971.

[4] E. Achenbach, «Distribution of local pressure ans skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to Re=5e6,» *Journal of Fluid Mechanichs,* vol. 34, nº 4, pp. 625-639, 1968.

[5] ANSYS, «User's Guide,» ANSYS Fluent, . [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/flu_ug/flu_ug.html. [Último acceso: 31 01 2025].

[6] ANSYS, «Theory Guide,» ANSYS Fluent, [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/flu_th/flu_th.html. [Último acceso: 31 01 2025].

ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ACÚSTICA DE MÚLTIPLES *JETS* SUPERSÓNICOS DE SALIDA DE MOTORES: PRIMERA APROXIMACIÓN NUMÉRICA

Juan Ignacio D'Iorio[a], Maxime Fiore[b], Romain Gojon[b], Vicente Nadal Mora[a]

[a]*UIDET GTA-GIAI, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. juanignacio.diorio@ing.unlp.edu.ar*
[b]*Département Aérodynamique et Propulsion (DAEP), ISAE-SUPAERO, Francia.*

Palabras claves: motores, ruido, *jets*, propulsión.

Introducción

El estudio de las propiedades e interacciones de los *jets* resultan de interés tanto en motores de aeronaves como de lanzadores. Si bien la principal aplicación es la propulsión, la comprensión de los mecanismos físicos que ocurren en chorros que impactan sobre superficies (*impinging jets*) – en reversores de empuje, sistemas de refrigeración de álabes, plataformas de lanzadores – es fundamental para conocer las características de fuentes discretas (tonos) de ruido, para posteriormente poder trabajar en la atenuación de ruido y disminuir el impacto en el ambiente.

Los *jets* en régimen supersónico presentan 3 componentes principales de ruido [1], [2]: ruido de mezcla turbulento, de banda ancha asociado a las ondas de choque (*BBSAN*) y el *screech*. El ruido de mezcla turbulento está producido por dos elementos del flujo: estructuras turbulentas de grande y pequeño tamaño [3], [4], [5]. Las primeras generan ruido –usualmente coherente y correlacionado espacialmente– que se irradia principalmente en la dirección del flujo (aguas abajo) por medio de la interacción entre dichas estructuras y el flujo adyacente, creando variaciones de presión (*Mach wave radiation*). Las estructuras de pequeño tamaño generan ruido lateralmente y en sentido contrario al movimiento; este suele ser aleatorio y no correlacionado. La interacción entre ambas escalas turbulentas define la huella o contorno de ruido del *jet*. El *BBSAN* se genera por la acción recíproca entre las estructuras turbulentas en la capa límite del *jet* y las celdas de choque (*shock cells*) [6]. La frecuencia del pico en el espectro está relacionada al espaciado entre celdas y la velocidad de convección de las estructuras turbulentas. El *screech* se caracteriza por presentar tonos discretos a frecuencias específicas. El mecanismo de generación consta de dos pasos: en primer lugar, las estructuras turbulentas que se desarrollan en la capa límite del *jet* y se trasladan corriente abajo interactúan con las celdas de choque cuasi-períodicas, generando ondas de sonido que se mueven aguas arriba. El *loop* de resonancia se cierra en la tobera, donde la capa límite del *jet* es excitada por las ondas que golpean los bordes (labios) de la misma (*aeroacoustic feedback loop*) [6], [7], [8]. En las frecuencias de los tonos generados, el *jet* experimenta fuertes oscilaciones. Se han identificado cuatro modos de *screech*: A (A1 y A2, modos axisimétricos), C (modo helicoidal), B y D (modos batientes o *flapping*) [9]. Si bien se ha realizado una extensa cantidad de estudios, tanto experimentales como numéricos, con un solo *jet*, y varios con dos [8], [10], aún no se conocen algunas características que definen el *screech* y la naturaleza de su comportamiento. Se han reportado casos de fallas por fatiga asociados a este fenómeno tanto en aeronaves civiles (VC-10) como militares (F-15, B1-B) [8]. Si bien se conocen las variables que definen el problema -geometría de la tobera y el *jet*, condiciones de la capa límite, distancia de la tobera a la placa (*impinging*), relación de presiones de la tobera (NPR), número de Reynolds, número de Mach- resulta importante continuar con el estudio de este componente de ruido para entender de forma más acabada el mecanismo de generación y, eventualmente, proponer formas de mitigación. En la Fig. 1 pueden visualizarse los 3 componentes que producen al ruido en el jet.

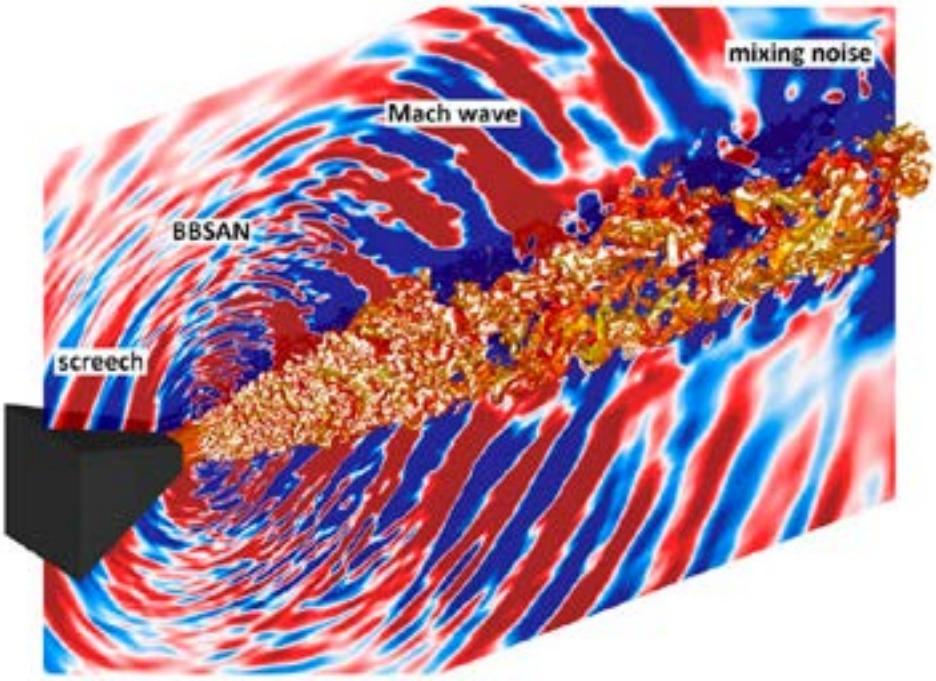


Fig. 1 – Isosuperficies de densidad en un plano coincidente con el eje menor de la tobera, de [6]. Pueden visualizarse las zonas de cada componente de ruido.

Desarrollo

Como primera aproximación para abordar el estudio de la generación de ruido, analizar sus componentes principales y familiarizarse con las diferentes herramientas, se propuso realizar una simulación LES (*Large-Eddy Simulation*) utilizando un único *jet*. Las herramientas necesarias para ello fueron provistas por el *Département Aérodynamique et Propulsion* (DAEP), a saber: un software desarrollado por dicho departamento, denominado IC3, y una computadora de alta performance (HPC), llamada Pando, perteneciente a la universidad (ISAE-SUPAERO). IC3 aproxima la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo compresible usando un método de volúmenes finitos, utilizando un mallado no estructurado. El flujo -en cada cara- se calcula usando valores interpolados de la presión, densidad y velocidad en el centro de cada volumen de control [11]. Pando posee una capacidad de cálculo de 206 TFLOPS, 2496 núcleos, 275 TB de memoria de almacenamiento, y es accesible para el personal de la universidad que realiza tareas de investigación [14].

Se utilizó una tobera convergente-divergente, con número de Mach de diseño (M_d) 1,56; presión total a la entrada (P_0) 4,0 *Patm*; temperatura total a la entrada (T_0) 367 K; diámetro de salida (A_e) 57,53 mm; relación A_e/A_t 1,23 y velocidad idealmente expandida (U_j) 491 m/s. El flujo saliente de esta tobera fue previamente simulado [12] para una P_0 de 3,5 *Patm*, y los datos obtenidos comparados con información experimental de [13].

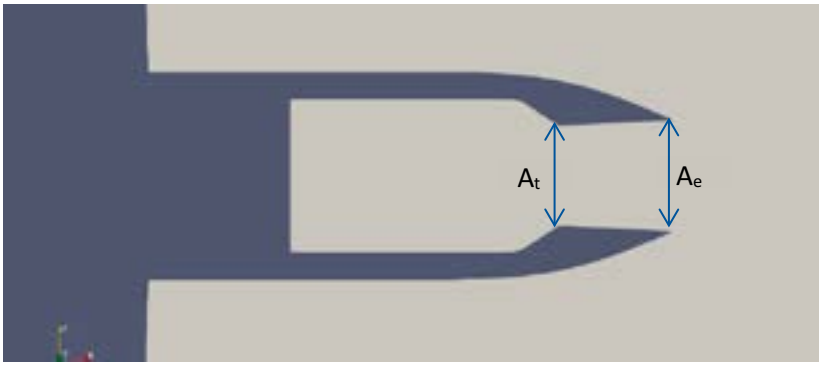


Fig. 2 – Corte longitudinal de la tobera.

Se realizó una adaptación del mallado estructurado utilizado en [12], reduciendo el mismo a un solo volumen, debido a que IC3 no permite la resolución en varios. También se optó por disminuir la cantidad de nodos para una resolución más rápida; se pasó de 94 a 5 puntos en la dirección radial del dominio, quedando 6 x 10^6 nodos, cuando en el original se tenían 160 x 10^6. A pesar de que el resultado de esta modificación implicó disponer de un mallado de inferior calidad, se consideró válido a los fines de este primer análisis. El tratamiento del mismo se realizó en Ansys ICEM CFD en Pando.

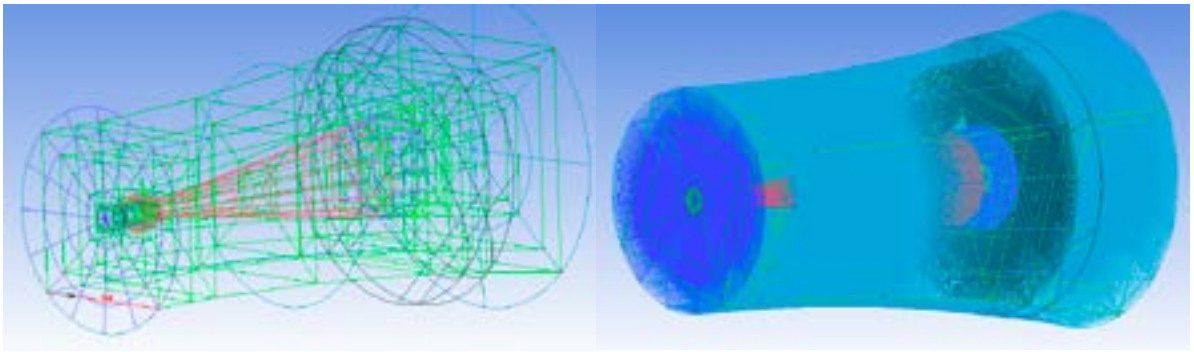


Fig. 3 – Vistas del mallado.

Posteriormente se preparó la simulación en IC3, definiendo como condiciones de entrada al dominio las citadas anteriormente, y que las de salida sean las de la atmósfera estándar, y considerando únicamente la velocidad en la dirección longitudinal de la tobera. Si bien se logró inicializar el caso, no se alcanzó la convergencia: al alcanzar aproximadamente unas 700.000 iteraciones se detuvo por valores inconsistentes en las variables. En la próxima figura se puede visualizar un corte en un plano longitudinal del dominio.

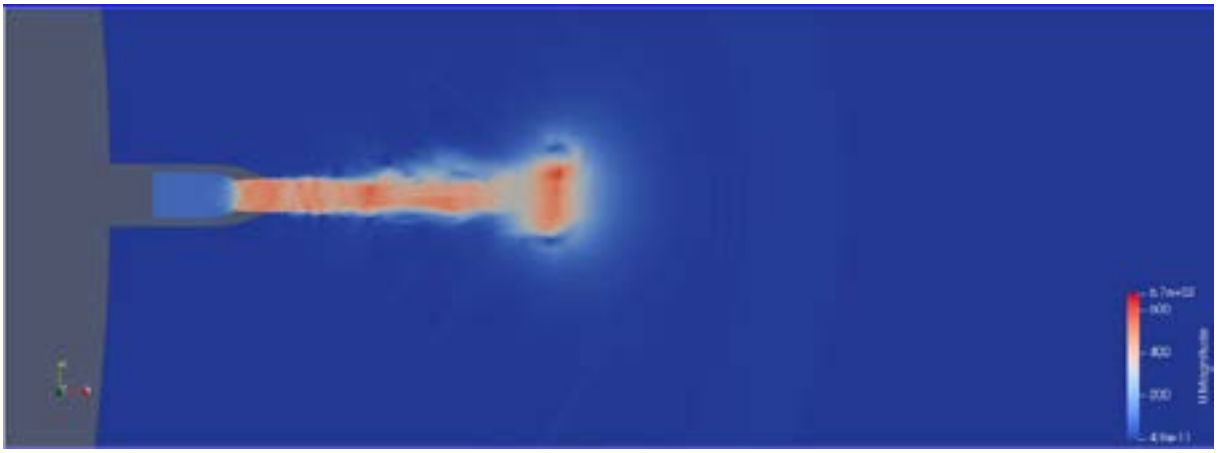


Fig. 4 – Velocidad en el eje longitudinal, de los datos de las últimas iteraciones en IC3.

Debido a la interrupción, se decidió por hacer una simulación RANS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*) en un software comercial, STAR-CCM, para poder utilizar la solución como entrada en el IC3. Al momento de la entrega de este trabajo no se ha llegado a una solución convergente.

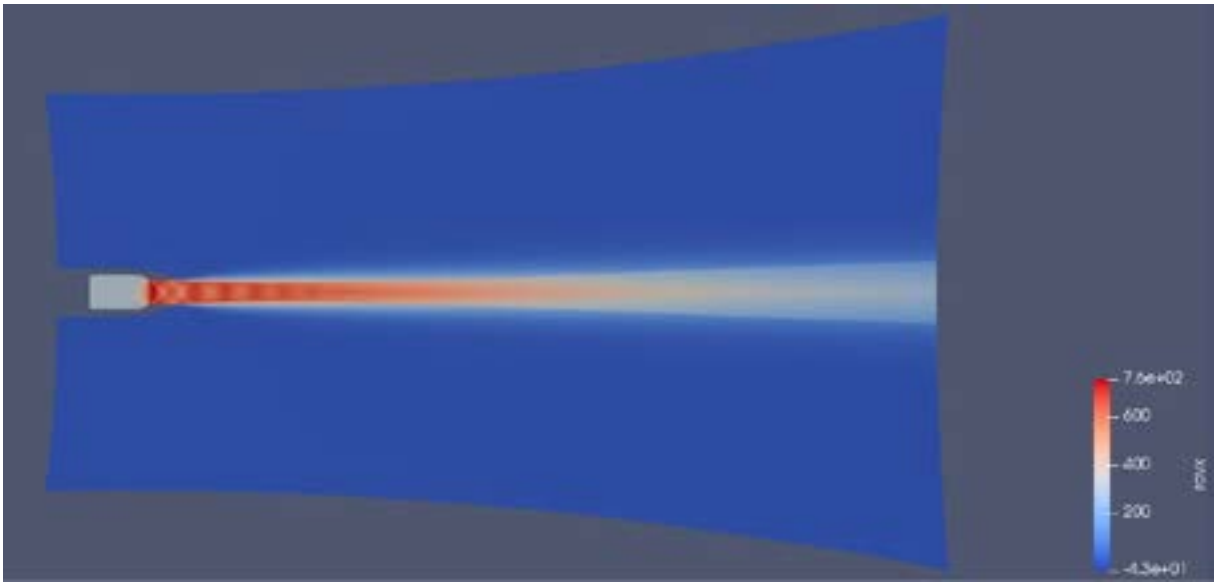


Fig. 4 – Velocidad en el eje longitudinal, de los datos de las primeras iteraciones en STAR-CCM.

Conclusiones

Si bien la intención de este trabajo era presentar los resultados obtenidos de una primera simulación LES, con el correspondiente post procesamiento de los datos y la discusión de conclusiones, esto no fue posible por las complicaciones encontradas en el proceso. Al momento de la entrega del trabajo se encontraba finalizando la simulación RANS. Queda pendiente la carga de esa solución en IC3 y la posterior simulación. También se realizará un post procesamiento de las variables obtenidas en STAR-CCM para la comparación y validación en relación a los trabajos anteriores.

Bibliografía

[1] R. Gojon, C. Bogey, and M. Mihaescu, “Oscillation Modes in Screeching Jets,” *AIAA Journal*, vol. 56, no. 7, pp. 2918–2924, Jul. 2018, doi: 10.2514/1.J056936.

[2] D. Edgington-Mitchell, V. Jaunet, P. Jordan, A. Towne, J. Soria, and D. Honnery, “Upstream-travelling acoustic jet modes as a closure mechanism for screech,” *J. Fluid Mech.*, vol. 855, p. R1, Nov. 2018, doi: 10.1017/jfm.2018.642.

[3] C. K. W. Tam, K. Viswanathan, K. K. Ahuja, and J. Panda, “The sources of jet noise: experimental evidence,” *J. Fluid Mech.*, vol. 615, pp. 253–292, Nov. 2008, doi: 10.1017/S0022112008003704.

[4] C. K. W. Tam, “Mach Wave Radiation from High-Speed Jets,” *AIAA Journal*, vol. 47, no. 10, pp. 2440–2448, Oct. 2009, doi: 10.2514/1.42644.

[5] C. Bailly and K. Fujii, “High-speed jet noise,” *Mechanical Engineering Reviews*, vol. 3, no. 1, pp. 15-00496-15–00496, 2016, doi: 10.1299/mer.15-00496.

[6] R. Gojon, E. Gutmark, and M. Mihaescu, “Antisymmetric Oscillation Modes in Rectangular Screeching Jets,” *AIAA Journal*, vol. 57, no. 8, pp. 3422–3441, Aug. 2019, doi: 10.2514/1.J057514.

[7] A. Powell, “On the Mechanism of Choked Jet Noise,” *Proc. Phys. Soc. B*, vol. 66, no. 12, pp. 1039–1056, Dec. 1953, doi: 10.1088/0370-1301/66/12/306.

[8] G. Raman, “SUPERSONIC JET SCREECH: HALF-CENTURY FROM POWELL TO THE PRESENT,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 225, no. 3, pp. 543–571, Aug. 1999, doi: 10.1006/jsvi.1999.2181.

[9] M. Stavropoulos, M. Mancinelli, P. Jordan, V. Jaunet, D. M. Edgington-Mitchell, and P. Nogueira, “Understanding twin-jet screech using a vortex-sheet model,” in *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2021. doi: 10.2514/6.2021-2249.

[10]M. N. Stavropoulos *et al.*, “The axisymmetric screech tones of round twin jets examined via linear stability theory,” *J. Fluid Mech.*, vol. 965, p. A11, Jun. 2023, doi: 10.1017/jfm.2023.398.
[11]H. Riwan, J. Stéphane, G. Jérémie, and G. Romain, “Simulation numérique des phénomènes instationnaires au sein d’une entrée d’air supersonique”, ISAE-SUPAERO, 2021.
[12]R. Gojon, C. Bogey, and M. Mihaescu, “Large Eddy Simulation of Highly Compressible Jets with Tripped Boundary Layers,” in *Direct and Large-Eddy Simulation XI*, vol. 25, M. V. Salvetti, V. Armenio, J. Fröhlich, B. J. Geurts, and H. Kuerten, Eds., in ERCOFTAC Series, vol. 25. , Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 333–339. doi: 10.1007/978-3-030-04915-7_44.
[13]D. R. Cuppoletti and E. Gutmark, “Fluidic Injection on a Supersonic Jet at Various Mach Numbers,” *AIAA Journal*, vol. 52, no. 2, pp. 293–306, Feb. 2014, doi: 10.2514/1.J010000.
[14] https://iris.isae-supaero.fr/pando-un-nouvel-equipement-de?lang=en

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMA VOLCADORA PARA CAMIONES

Pasquevich Facundo, Alvarez Fredy, Chiswell Pilar.

Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.

facundo.pasquevich@ing.unlp.edu.ar

Introducción

La plataforma volcadora es una estructura auxiliar utilizada en instalaciones de acopio de granos, para realizar la descarga de la carga desde camiones de transporte, específicamente, para los cuales no poseen un sistema propio de volcado para realizar dicha tarea.

En el presente trabajo se presenta el análisis estructural de la plataforma volcadora de 21 metros de largo y 3 metros de ancho con el agregado de un nuevo componente correspondiente a un cobertor estructural, que se encuentra por encima de la plataforma, el cual transmite fuerzas a la plataforma, las que se generan al ser sometido el conjunto a diferentes estados de carga y ángulos de inclinación. El funcionamiento de esta plataforma comienza cuando el camión se posiciona sobre la plataforma y se lo fija con unas trabas que posee la misma. Al fijarse el vehículo en posición, se abre su compuerta trasera y luego se accionan ciertos actuadores hidráulicos, los cuales inclinan la plataforma para realizar la descarga de granos por dicha compuerta. Una vez que el camión es completamente descargado se lo devuelve a su posición horizontal.

La plataforma volcadora debe ser diseñada para mantener el vehículo en sus distintas posiciones durante el proceso de descarga. En este contexto, se lleva a cabo un rediseño integral de una plataforma existente, dimensionando sus componentes mediante cálculos estructurales que consideran las diferentes cargas y solicitaciones a las que puede estar sometida, como el peso del vehículo y propio de la plataforma, así como la carga de viento.

Además, se realiza la verificación y el análisis de los componentes auxiliares que facilitan el correcto levantamiento de la plataforma, como son los actuadores hidráulicos. Este análisis incluye también la evaluación de los mecanismos de vinculación entre los actuadores y la plataforma y de los sistemas auxiliares involucrados en el proceso de levantamiento.

Este informe técnico ofrece una visión detallada y exhaustiva del proceso de rediseño, así como de los requisitos técnicos necesarios para la implementación efectiva de una plataforma volcadora para camiones.

Parte experimental

El análisis estructural de esta plataforma se llevó a cabo mediante simulaciones mediante un software utilizando el método de los elementos finitos, donde se realiza el estudio sobre la misma, que consiste principalmente de 4 vigas longitudinales de sección cajón vinculadas entre sí a través de 6 vigas transversales también de sección cajón, toda esta recubierta por

una chapa. La plataforma se encuentra vinculada a la base a través de 4 ejes que permiten la rotación de la plataforma mediante unas bisagras ubicadas en la zona delantera y trasera.

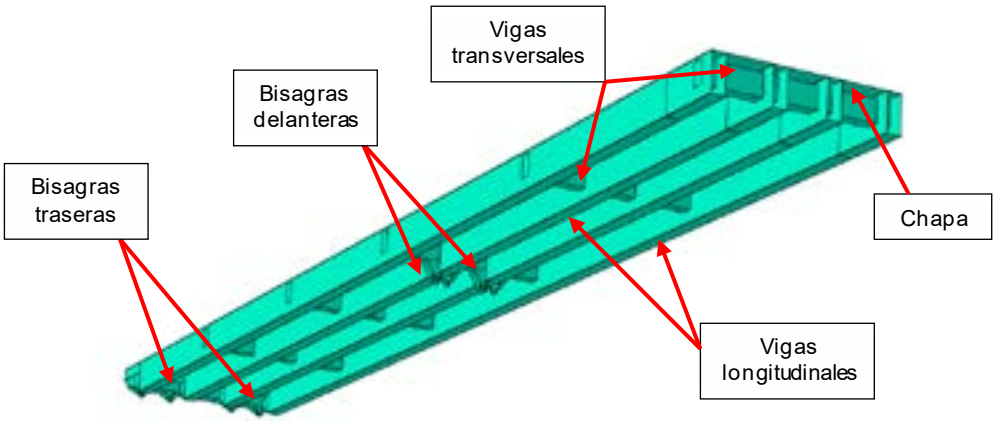


Figura 1. Modelo de la plataforma.

Se evalúan distintos casos, con la plataforma en su posición horizontal a 0°, como también la de máxima inclinación a 42°, considerando un camión cuya masa total es de 52,5 Tn, siendo este el caso más comprometedor para la estructura. Las distintas cargas a las que se encuentra sometida son las siguientes:

- E1: Peso propio Estructura
- E2: Sobrecargas (s/ techo)
- E3: Viento Lateral 1
- E4: Viento Lateral 2
- E5: Viento Frontal 1
- E6: Sobrecargas Camión 52,5 Tn

Estas se combinan de diferentes maneras, simulando así múltiples situaciones posibles de uso.

El material utilizado en el análisis es acero F-24. Se adopta a su vez un factor de seguridad de 1,6 utilizando así una tensión admisible de 150 MPa. Se realiza un mallado detallado, utilizando elementos de tipo cuadrilateral y triangular en función de la geometría y las necesidades de precisión del modelo.

En cuanto a las condiciones de borde en el modelo, se establecen restricciones en desplazamientos y acoplamientos mecánicos para simular la fijación de la plataforma y su interacción con los actuadores hidráulicos. Estas restricciones incluyeron la inmovilización de puntos estratégicos y la vinculación de elementos estructurales, para reflejar de manera precisa el comportamiento de la plataforma en operación. De esta manera, algunos elementos son reemplazados por el efecto que estos generan sobre la plataforma, sin la necesidad de representarlos gráficamente, como es el ejemplo del cobertor.

Las cargas se aplican de manera distribuida sobre la plataforma o en puntos clave donde se vinculan otros elementos estructurales. En las figuras a continuación se pueden ver gráficamente algunas de ellas.



Figura 2. Ubicación de cargas transmitidas por el cobertor.

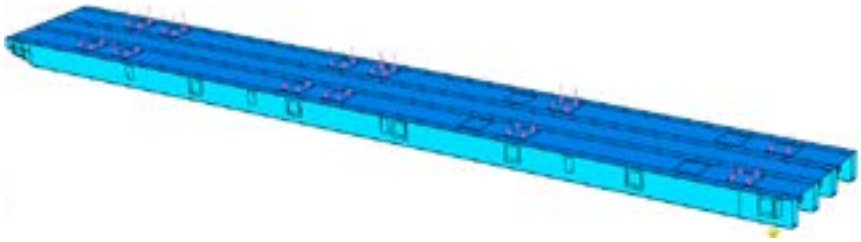


Figura 3. Ubicación de cargas debido al peso del camión.

Con respecto a la plataforma inclinada, se asume que en su posición de máxima elevación el peso del camión es el 50% del peso en horizontal, a modo tal de tener un caso conservativo. Estas cargas se descomponen en una componente transversal, donde apoyan las ruedas, y una longitudinal, a la altura del centro de cada rueda.

También se verifican los actuadores hidráulicos. Estos son telescópicos y cuentan con tres tramos, pudiendo así ubicarse en tres posiciones de inclinación distintas. Estos van vinculados a la plataforma por medio de las bisagras delanteras. Para verificar el correcto funcionamiento de estos, se modelan las cargas sobre la plataforma para el caso más crítico, con el peso del camión repartido entre el chasis y el acoplado, el peso de la plataforma, y la fuerza producida por los actuadores en los apoyos delanteros. Luego se calcula el momento generado por la separación de las bisagras delanteras, se comprueba si la distancia entre dichos apoyos es capaz de tolerar ese torque producido por la acción del viento.

Resultados y discusión

Tanto para la plataforma horizontal como inclinada, existen combinaciones de estados de carga que resultan críticos, donde en varias zonas el campo de tensiones supera el valor admisible de 150 MPa.

Para el modelo inclinado, estas zonas se encuentran principalmente localizadas en las vinculaciones entre la plataforma y el cobertor, en las vinculaciones entre las vigas longitudinales y las vigas transversales y en la parte trasera de la plataforma donde se encuentran las bisagras traseras. Se pueden observar a continuación, remarcadas en color gris.

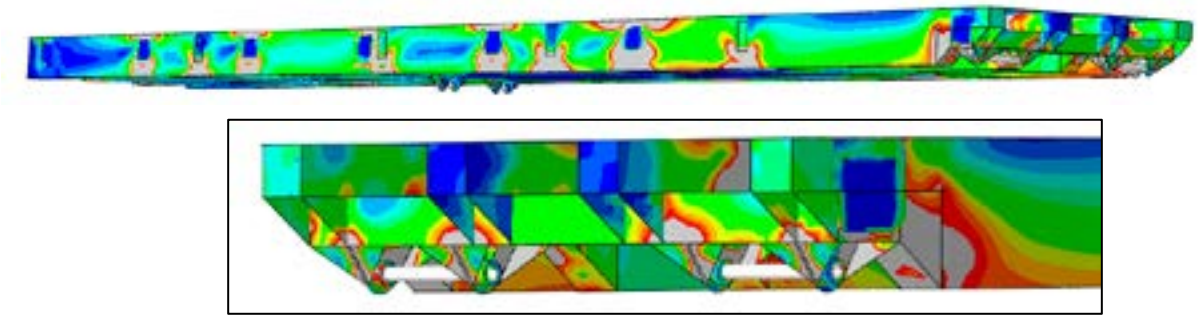


Figura 4. Campo de tensiones – Plataforma inclinada.

Para el modelo horizontal, estas zonas se encuentran principalmente localizadas en las platabandas de las vigas longitudinales, las vinculaciones entre la plataforma y el cobertor, las vinculaciones entre las vigas longitudinales y transversales y las bisagras delanteras.

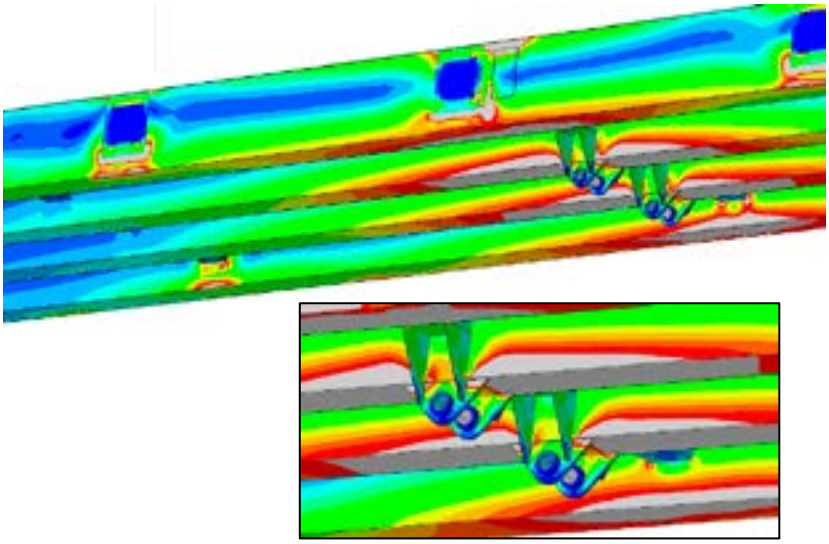


Figura 5. Campo de tensiones – Plataforma horizontal.

A partir de los resultados obtenidos, se plantean modificaciones a realizar. Con respecto a las bisagras delanteras, se propone la reubicación de las mismas llevándolas desde las vigas longitudinales centrales a las laterales, así como también el rediseño de las mismas, modificando las terminaciones en punta, espesor y dimensiones.

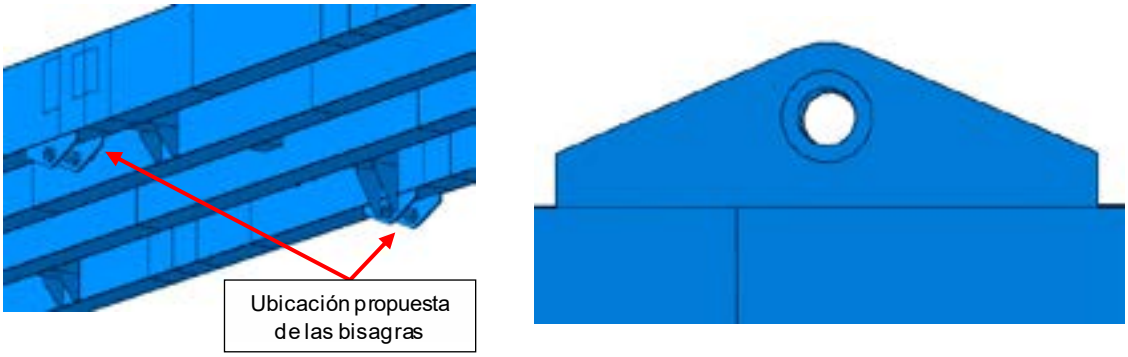


Figura 6. Bisagras delanteras.

También se propone agregar una chapa de refuerzo a todas las vigas longitudinales en la zona donde se ubican las bisagras delanteras, con la finalidad de distribuir mejor los esfuerzos que se trasmiten, mejorando así también la rigidez a la flexión de la estructura.

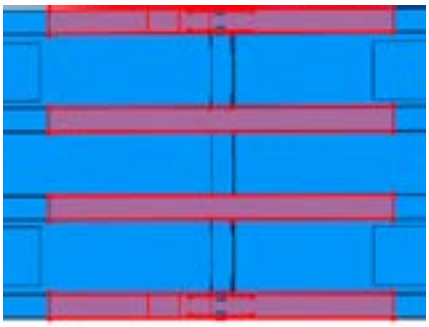


Figura 7. Chapa de refuerzo en vigas longitudinales.

A las vigas longitudinales se les modifica el espesor a lo largo de toda la cara inferior, donde se encuentran colocadas las bisagras. Además, en las caras laterales exteriores de estas, se amplían los paños de refuerzo, donde se vincula la plataforma con el cobertor. En esta misma zona, en el interior de la viga, se colocan tres chapas a modo de refuerzo.

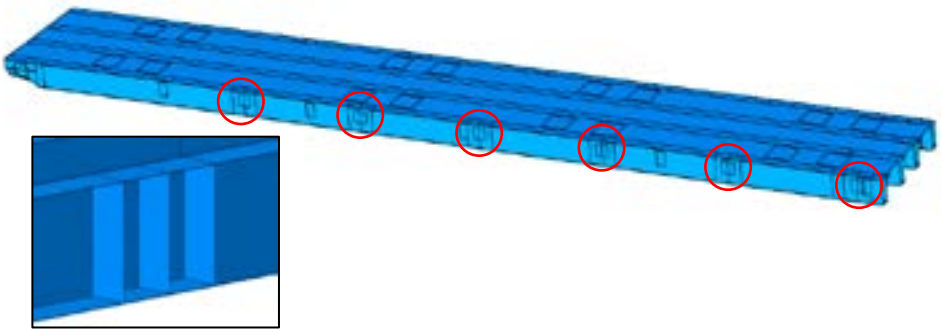


Figura 8. Refuerzos en vigas longitudinales.

En las vigas transversales, en los puntos donde se vinculan con las longitudinales, se agregan refuerzos. Estos mejoran la transmisión de esfuerzo entre ambas y disminuyen allí las tensiones.

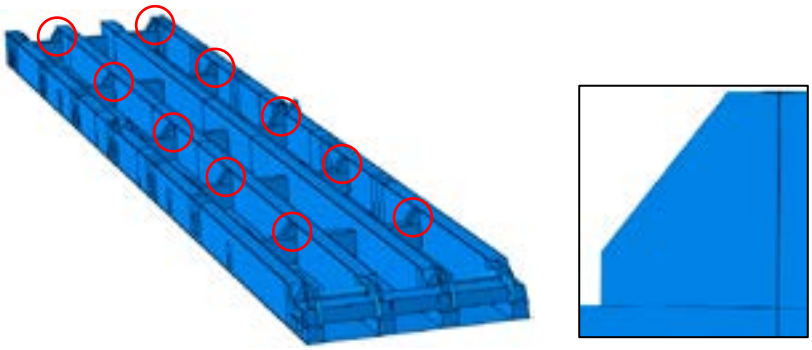


Figura 9. Refuerzo en vigas

En cuanto al cajón que corresponde a la viga transversal trasera, se ensancha y se le aumenta el espesor de todas sus paredes, siendo aún mayor el de la que se vincula con las bisagras. Los refuerzos de esta parte también se modifican, y junto con eso se aumenta el espesor de este y las paredes laterales de la zona.

Con la ampliación del cajón trasero, las bisagras traseras también se modifican, haciendo que estas ocupen todo el ancho del mismo y que tengan un mayor espesor. Se mantiene el tamaño del eje y el centro de rotación, por lo que el agujero por donde pasa no se encuentra centrado en la bisagra.

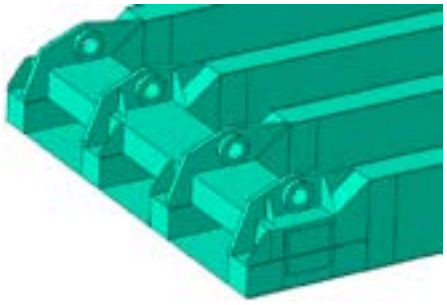


Figura 10. Viga transversal y bisagras traseras.

Con todas las soluciones adoptadas se obtienen los siguientes resultados:

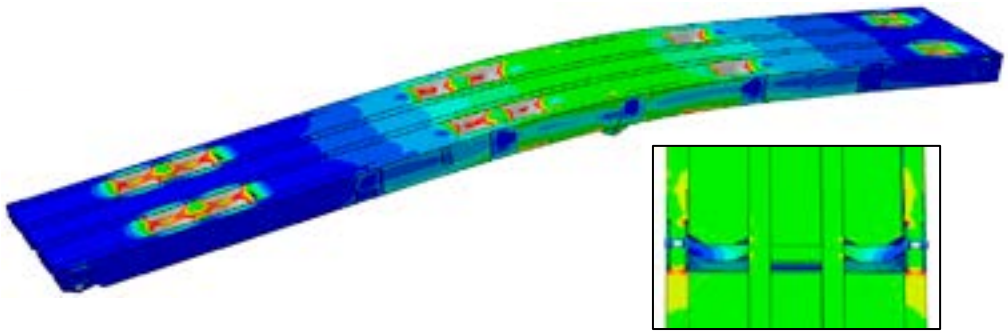


Figura 11. Plataforma modificada - Posición horizontal.

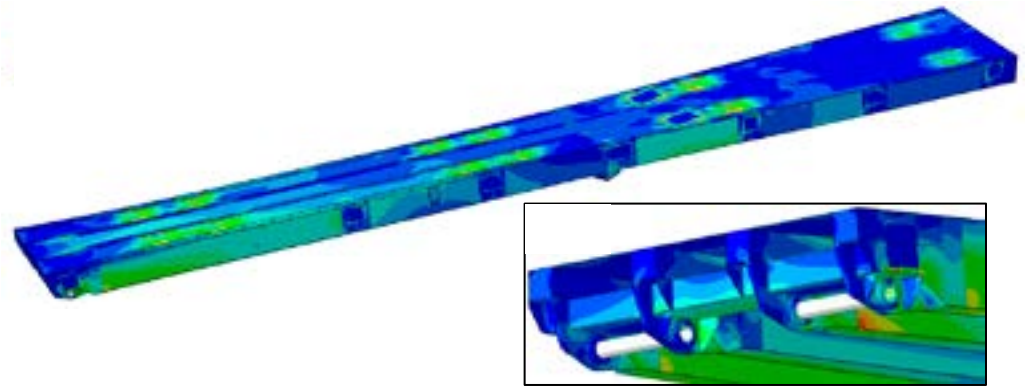


Figura 12. Plataforma modificada - Posición inclinada.

Conclusiones

A partir de los resultados que se obtienen se puede ver que tanto las tensiones presentes en las bisagras delanteras, las vinculaciones entre el cobertor y las vigas longitudinales y el cajón trasero mejoran considerablemente llegando a valores de tensiones de trabajo menores a la admisible (150 MPa) en comparación de las que se obtienen sin las modificaciones con excepción de algunas zonas puntuales donde se supera levemente este valor debido a cuestiones relacionadas al modelo.

Por lo tanto, se puede concluir, que las modificaciones que se proponen para la plataforma son las adecuadas para los estados de carga presentados anteriormente.

Bibliografía

Finite Element Modeling for Stress Analysis, Robert D. Cook.

CIRSOC 301 Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios.

Shigley's Mechanical Engineering Design, Richard G. Budynas.

VENTILACIÓN DE CENTROS DE DATOS: INTERVENCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

J. Piechocki; V. Nadal Mora; S. Pezzotti; R. Garlatti; L. Cabarcos

UIDET GTA-GIAI, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.

joaquin.piechocki@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

La operación de centros de datos tiene implícito el funcionamiento de un sistema de ventilación para disipar el calor generado por los procesadores. Los equipos asociados al procesamiento de datos de las tecnologías de la información y la comunicación (equipos TIC) están diseñados para operar en un rango de temperaturas específico, siendo su velocidad de cómputo y su vida útil, dependientes de la temperatura de las placas del conjunto procesador. El consumo de energía del sistema de ventilación, cuya función está subordinada al procesamiento de datos, puede representar más del 50% del consumo total de energía del centro.

Los efectos de que el sistema de ventilación utilice magnitudes de energía tan elevados incluyen no sólo costos operativos, sino también impactos tanto ambientales como en el ciclo de vida de los sistemas. Dado el auge de esta pieza de infraestructura dentro de la técnica del manejo de datos, hoy ubicua, la mejora de su eficiencia es clave para el desarrollo sostenible.

Argentina cuenta con condiciones climáticas propicias para la instalación de centros de datos. Esta aseveración es verdadera en el marco del desarrollo sostenible sólo a condición de que se estructuren intervenciones efectivas que reduzcan el consumo de energía en la ventilación, los costos de sistemas de distribución eléctrica y la necesidad de disponibilidad de potencia.

El presente trabajo propone disposiciones técnicas básicas a desplegar sobre una instalación típica de un centro de datos en el AMBA en relación a las condiciones medioambientales, las cuales involucran las etapas de planificación, proyecto y operación de centros de datos.

Palabras clave: centro de datos, ventilación, desarrollo sostenible

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía de los sistemas de ventilación de centros de datos supone del orden del 50% del consumo total de energía, pudiendo ser más severo en algunas instalaciones (Steve Greenberg, 2006; Jin, 2020), dependiente de la estrategia desplegada para la refrigeración.

En los sentidos de economizar medios para la producción y de disminuir la huella ecológica, resulta imperativo para los centros de datos implementar sistemas de ventilación que contribuyan a la reducción del consumo de energía en relación a los sistemas de refrigeración típicos.

La condición más difundida de configuración de sistemas de ventilación es aquella basada en sistemas de refrigeración por ciclo de compresión de vapor en funcionamiento continuo (equipos de aire acondicionado comerciales), que recirculan el aire de la sala que alberga al centro de datos, sin una estrategia consistente de intervención sobre el flujo de aire en el interior.

Una estrategia que busca mejorar el desempeño en la utilización de energía suele llevar el nombre de “tecnología de ciclo economizador”. Este hace uso del clima ambiental, especialmente en áreas templadas y frías, para disminuir la demanda de los equipos de refrigeración, CRAC (Computer Room Air Conditioning), dentro de las instalaciones de los centros de datos. Tres factores fundamentales afectan el uso de los economizadores: la ubicación geográfica, el rango de operación objetivo de los equipos instalados (y en consecuencia del centro de datos), y el control de las corrientes de aire en la ventilación interior de la sala.

El objetivo de este documento es, a partir de un caso típico de aplicación en la ciudad de La Plata, producir la descripción general de una arquitectura simplificada que pueda orientar intervenciones en centros de datos y establecer pautas básicas para la utilización del ciclo economizador con utilización de aire directo del exterior.

METODOLOGÍA

Se considerará a los fines del presente trabajo un centro de datos que pueda resultar típico en el ámbito local, compuesto básicamente por racks de equipos que posibilitan el cómputo digital dentro de una sala dispuesta a este fin.

A lo largo del tiempo, la densidad por rack ha aumentado progresivamente como resultado de los avances tecnológicos que responden magnitudes crecientes de cómputo de datos. Entre las corrientes tecnológicas asociadas se encuentra la virtualización de los procesos, el denominado *edge computing* que supone procesamientos distribuidos y cercanos, y la inteligencia artificial. Como tendencia general, esta densidad suele estar correlacionada con el tamaño del centro de datos. Centros de datos de media escala, típicos de la región, suponen potencias por rack en un rango que va de 5 a 10 kW.

La arquitectura típica los centros de datos suele incluir la definición de una zona de inyección de aire frío en forma de pasillo, donde se ubican los frentes de los equipos, y la extracción de aire de ventilación en zona posteriores de los racks. El principio que guía esta definición es la búsqueda de que las masas de aire atraviesen los equipos para extraer el calor residual y mantener estable su operación, controlando la temperatura. Estas masas de aire servidas son colectadas en las zonas posteriores de los racks, que se define como zona caliente. El abordaje típico de sistema de ventilación incluye la instalación de equipos de aire acondicionado por ciclo de vapor que recirculan la masa de aire de ventilación, reinyectándola a una temperatura objetivo en la zona de frentes de los racks definida por la temperatura de servicio objetivo de los equipos TIC (tecnologías de la información y la comunicación). En síntesis, la previsión fundamental que se observa es la definición de una zona anterior, fría, de inyección, y una posterior, caliente, de captación de aire servido. Este planteo incluye una frontera que define las zonas, la cual suele ser virtual, dada por la línea media de una fila de racks que suelen conservar espacios de circulación entre sí y entre ellos, y los muros de la sala.

Esta condición de base, característica de los centros de datos, tiene como consecuencia la aparición de corrientes no aplicadas a la función objeto del sistema de ventilación, que incluye corrientes que pasan por la frontera entre zonas sin pasar por un equipo que demande refrigeración, o flujos de derivación, y corrientes que recirculan entre la zona caliente y la fría. Entre las corrientes de derivación están las que se producen en la frontera entre zonas, las que se producen a nivel de los racks y las que se producen a nivel de los equipos. Las corrientes que recirculan, por otro lado, surgen en función de la presión relativa entre zonas no compartimentadas.

En función de esta definición, se asume como condición de base característica, y de nuestro caso, que haya un 20% de aire de derivación del total de la masa total inyecta y un 10% recirculada entre la zona caliente y fría.

Como ya se mencionó, la temperatura de operación puede afectar la confiabilidad de los equipos TIC y reducir su vida útil, por esta razón cada fabricante define rangos de operación

normal, otros donde la potencia de cómputo se penaliza y temperaturas límites. En este sentido ASHRAE publicó un agrupamiento en clases de operación normal que define rangos que van de 5 a 45 °C (ASHRAE, 2024). Sintéticamente se recomienda una ventilación de los equipos con aire menor a 27 ºC para obtener condiciones de funcionamiento cercanas a la óptima.

Cabe comprender entonces, que una instancia a escala de los equipos TIC es el control de la potencia destinada al procesamiento de datos en función de su temperatura interna, consecuencia de la temperatura de aire ambiente a la entrada de los *coolers* propios. Una de las mejoras más comunes en el ahorro de energía está en el algoritmo de velocidad que utilizan los equipos para regular el caudal. La mayoría de los servidores tienen definido límites de temperatura máximas del aire servido a la salida entre 58 y 60 °C.

En función de esta condición se adopta como temperatura objetivo de alimentación de aire de ventilación una temperatura menor a 22 ºC, que representa un salto de 38 ºC con respecto a la temperatura límite mencionada. Esta temperatura oficia como marca típica de control de la ventilación de la sala.

Las condiciones del clima ambiental de los centros de datos representan un dato operativo que tiene una importancia de primer orden tanto para los equipos TIC como para los equipos de potencia, que determina tanto la cantidad de energía que se debe destinar a la ventilación para el sistema específico adoptado como la táctica de ventilación. Por otro lado, en una fase de planificación, determina los límites de las estrategias de economización de la ventilación.

Modelado del sistema de ventilación

El caudal de ventilación de diseño es un parámetro que resulta de las condiciones de ventilación que se establezcan, en el cual subyace la cantidad energía dedicada al objeto del sistema: mantener un determinado tipo de operación.

Denominaremos entonces como Caso 1 a aquel que describe una potencia de los equipos TIC de 30 kW. Definimos un patrón típico de distribución de las masas de aire de ventilación (de un 20% de la masa total derivada y un 10% recirculado). Como Caso 2 definimos esta misma condición con cantidades mínimas de aire recirculado y derivado, estableciendo rangos de beneficio a través del control de los patrones de distribución.

Los índices más difundidos que se utilizan para caracterizar el desempeño del sistema de ventilación de un centro de datos incluyen (Xie, Wang, & Liu, 2018) a:

- ELI (Exergy Loss Index), que indica la exergía perdida de manera adimensional,
- COP (Coefficient of Performance), que indica el desempeño del sistema de refrigeración,
- SHI (Supply Heat Index), que indica la eficiencia en el control de los caudales parasitarios.

Estos tres índices en conjunto tienen la capacidad de calificar la ventilación del centro de datos cubriendo los aspectos complementarios que se mencionan. En la tabla que sigue se presentan índices de desempeño del sistema de ventilación, estimados para los casos en análisis en base a una configuración típica.

Parámetro	Caso 1	Caso 2
masa total de aire de ventilación, kg/s	1.13	0.84
SHI	0.081	0.007
ELI	78%	81%
COP	71%	97%

A partir de estos índices se puede observar que existen oportunidades de mejoras cuantificables que derivan en el ahorro de consumo del conjunto, con un impacto relevante, a partir de control de las masas de aire de derivación y de recirculación. Estas resultan

proporcionales al aumento de la temperatura de control del sistema a la salida de los racks y al aumento de la masa total de aire de ventilación para establecer una misma condición operativa de los equipos TIC.

El control de la ventilación interior supone configurar la circulación de aire utilizado a este fin, y esto supone el establecimiento de su recorrido y caudales.

La condición buscada que establecen estos índices es que una masa de aire a una temperatura lo más cercana posible a la que entrega el CRAC recoja la carga térmica de los equipos TIC y sea extraída de la sala a una temperatura cercana a la temperatura de salida de los equipos. En definitiva, se busca limitar las corrientes parásitas. Sin embargo, la inyección de aire induce como mínimo la aparición de masas de aire: 1/que recirculan, 2/que no pasan por los equipos. Si no existieran estas masas de aire adicionales, la presión de ventilación de aire inyectado en la sala contribuiría al flujo a través de los equipos TIC independientemente del control de fan que dispongan, produciendo beneficios no sólo en la disminución general del consumo en ventilación, sino en los mismos equipos además de los potenciales beneficios en el ciclo de utilización. Por otro lado, como beneficio secundario, el diferencial de la presión en el ingreso permite una menor circulación de material particulado en los equipos.

Utilización del aire exterior

La utilización de aire ambiente tiene el potencial de oficiar de fuente de refrigeración alternativa, de baja utilización de energía, con la desventaja de necesitar filtrado y control de humedad. Su utilización se encuentra supeditada a las condiciones de temperatura ambiente y de las condiciones de humedad imperantes. Los días que no se cumple con esta condición de temperatura, es factible complementar al sistema de ciclo de vapor con un intercambiador de calor con el suelo, tipo túnel (Singh, 2023).

Una media anual de 19 ºC y un régimen de distribución anual de la temperatura ambiente según una distribución normal en torno a este valor, con desviación estándar de 6 ºC, representa una condición característica del AMBA. Si establecemos como hipótesis esta descripción parcial, es posible obtener la probabilidad de superar una determinada marca térmica ambiente con un nivel de confianza específico. Bajo este modelo se puede esperar que las temperaturas del aire ambiente inferiores a 22 ºC representen el 67% de las horas del año.

La efectividad del intercambio que puede alcanzarse por estos sistemas es del orden de 60%, que aplicado al caso que nos ocupa tiene el potencial de reducir hasta el 30% de consumo de potencia del ciclo para el caso de centros de datos ubicados en el AMBA.

Aislación térmica

La aislación térmica pasiva reduce la utilización de energía en la operación de los centros de datos, tanto en su aplicación interior como exterior. Este tipo de estrategias afecta la arquitectura del centro de datos, en particular la altura de los cielorrasos, la materialidad de los tabiques interiores, su disposición en compartimentos con distinta temperatura media, la relación de aspecto de la planta, su orientación, el nivel de aislamiento de muros exteriores y techo, la irradiación solar sobre superficies vidriadas o sobre los muros exteriores (Cai, 2024).

CONCLUSIONES

Los criterios de diseño generales, prácticos, tendientes a mejorar la eficiencia de los centros de datos en nuestra región son:

- Planificar la condición de intercambio de calor con el medio ambiente en la etapa de proyecto arquitectónico, adecuando orientación, relación de aspecto de la planta, altura con el objeto de minimizar el ingreso de calor, e insolación.

- Adoptar medidas de control pasivo de la transmisión de calor, en tabiques interiores, en muros exteriores, en el techo, tanto en el dimensionamiento de áreas de intercambio como en la materialidad y terminación superficial.
- Disponer de espacios interiores de evacuación de aire caliente (pasillos calientes) y de inyección de aire (pasillos fríos) materialmente definidos, con la mayor estanqueidad posible. En el caso propuesto supone un 34% menos de consumo de energía.
- Bloquear el paso del aire por los espacios vacíos de los racks.
- Utilizar equipos de tal forma que la circulación de aire en su interior vaya del contrafrente al frente. En los casos especiales donde no sea posible, (salida de aire inferior o superior) disponer de un espacio estanco al pasillo frío que oficie de conducto de evacuación.
- Disponer de equipos en los racks de forma de propender a que en su superficie frontal se desarrollen caudales de ventilación lo más homogéneos posible.
- Utilizar aire exterior directo, supeditado a que la temperatura ambiente sea propicia y la humedad se encuentre dentro del rango de utilización. Para el AMBA, aplicado al caso anterior, supone una reducción del 23% de la energía aplicada a la ventilación.
- Complementar el uso de sistema de refrigeración por ciclo de vapor con un intercambiador de calor con el suelo, EATHE (earth–air tunnel heat exchanger), aplicado a la recirculación de aire.

Este conjunto de criterios que se sintetizan de la experiencia recogida indica que el costo energético y ambiental de los centros de datos dependen en gran medida de la planificación y diseño de la infraestructura, y la operación. En relación a esta última, para poder hacer uso de distintas herramientas de control térmico es necesario disponer de un control lógico programable en donde se establezcan las actuaciones de forma automática. El conjunto de medidas habilita saltos cuantitativos muy relevantes en términos de consumo de energía que incluso impacta en la vida útil de los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE. (2024). *ASHRAE TC 9.9 Datacom Encyclopedia*. ASHRAE.

Cai, S. &. (2024). Towards energy-efficient data centers: A comprehensive review of passive and active cooling strategies. *Energy and Built Environment*.

Jin, C. B. (2020). A review of power consumption models of servers in data centers. *Applied Energy*.

Nambial, D. e. (2019). Performance of Thermo Hydraulic Designed Single Pass Earth Air Heat Exchanger. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 55-62.

Singh, R. &. (2023). Earth Tube Heat Exchanger: An Energy-Efficient Solution for Building Ventilation. *International Journal of Engineering Research in Current Trends (IJERCT)*.

Steve Greenberg, E. M. (2006). Best Practices for Data Centers: Lessons Learned from Benchmarking 22 Data Centers. *Proceedings of the ACEEE summer study on energy efficiency in buildings in Asilomar*.

Xie, M., Wang, J., & Liu, J. (2018). Evaluation metrics of thermal management in data centers based on exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE COMPONENTES PARA UN REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN Y PRODUCCIÓN DE RADIOISÓTOPOS

Alberro, José; Del Río Pauletti, Catalina; Ferreyra, Aldana; Mascioni, Gastón; Piella, Juan Manuel; Ringegni, Pablo; Sansotta Juliana; Saraví Gamboa, Bautista.

U.I.D.E.T GEMA - Calle 116 y 48 - La Plata - Buenos Aires – CP1900
jose.alberro@ing.unlp.edu.ar

Introducción

INVAP es una empresa líder a nivel mundial en el diseño y construcción de reactores nucleares multipropósito. En el marco del desarrollo de un reactor nuclear destinado a la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas, el U.I.D.E.T GEMA asiste en el análisis estructural detallado de diversos sistemas de las piletas del reactor, de servicio y en recintos contiguos a las mismas. Este estudio tiene como objetivo evaluar la integridad estructural de estos sistemas mediante el método de los elementos finitos (FEM), garantizando el cumplimiento de normativas internacionales y la obtención de la licencia de operación.

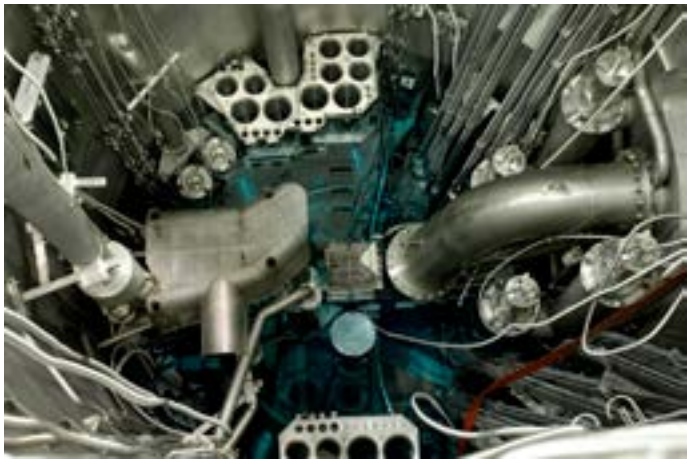


Figura 1: Sistemas de la pileta del reactor

Parte Experimental

Normativas para el proyecto:

Para la ejecución del análisis estructural, se cumplen con los lineamientos establecidos en la normativa KTA 2502, ref. [1], emitida por la Comisión de Seguridad Nuclear (KTA), la cual define los requisitos y medidas de seguridad para mitigar los riesgos asociados a la construcción y operación de centrales nucleares. La normativa es aplicable al diseño mecánico de las piletas del reactor y de las estructuras internas.

Esta normativa define los tipos de acción y las combinaciones de acciones, así como los coeficientes parciales y de combinación para los tipos de acción y las combinaciones de acciones. Además, establece los requisitos relativos a la verificación del estado límite último y del estado límite de servicio y especifica los coeficientes parciales de seguridad para los valores característicos de las propiedades de los materiales.

Las acciones se dividen en tres grupos diferentes, permanentes (G), variables (Q) y accidentales (A).

Entre las acciones G y Q se estudian el preso propio de la estructura, cargas de los materiales almacenados (por ejemplo, elementos combustibles), la masa de agua agregada, cargas de las conexiones, acciones térmicas, cargas de las herramientas y accesorios de elevación, entre otros.

En cuanto a las acciones A, se contemplan aquellas originadas por los accidentes base de diseño internos del reactor, así como por los sucesos externos que deben tenerse en cuenta, entre ellos se incluyen las acciones térmicas por la pérdida de agua refrigerante y las cargas debidas a sucesos externos como terremotos o amenazas terroristas considerando explosiones externas o el impacto de una aeronave.

En función de estos aspectos, se establecen las combinaciones de acciones y se asignan a las diferentes categorías de requisitos A1, A2 o A3.

La categoría A1 considera las combinaciones de acciones operativas derivadas de las situaciones de diseño, conforme a la norma DIN EN 1990, ref. [2], mientras que la categoría A2 contempla las acciones variables y accidentales que deban suponerse repetidas a lo largo de la vida útil. Deberá garantizarse la plena funcionalidad cuando se presentan estas combinaciones.

La categoría A3 considera las combinaciones de acciones accidentales con una baja probabilidad de ocurrencia. Las deformaciones plásticas significativas son admisibles, siempre y cuando no vulneren aspectos relacionadas con la seguridad.

El análisis estructural se realizó aplicando el método de los elementos finitos (FEM), que permite evaluar el desempeño mecánico de las estructuras bajo las diversas combinaciones de carga.

El software de cálculo que se utiliza para el proyecto es Ansys Mechanical y se requiere efectuar una validación del mismo, considerando la configuración de hardware instalado en cada computadora de acuerdo con las directrices de la normativa aplicable.

Se emplearon modelos tridimensionales de los sistemas bajo estudio, considerando materiales y propiedades mecánicas obtenidas de la normativa aplicable, ASME BPVC sección II, ref. [3].

La verificación se realiza teniendo en cuenta la correlación de combinaciones de acciones y las categorías de requisitos especificadas para las estructuras y componentes.

Los coeficientes parciales de seguridad y de combinación se aplican según las combinaciones de acciones para el estado límite último (ULS) y el estado límite de servicio (SLS).

En conformidad con la normativa DIN EN 1993-1-1, ref. [4], las estructuras bajo estudio se verifican con el procedimiento Elástico - Elástico (resultantes de tensión por la teoría de la elasticidad - resistencia a la tensión por la teoría de la elasticidad).

El análisis estructural se basa en los estados límites, LS según sus siglas en inglés, definidos en DIN EN 1993-1-6, ref. [5], y que se mencionan a continuación:

LS1: Estado límite plástico

Es la condición en la que la capacidad portante de la estructura se ve comprometida debido a la fluencia plástica del material.

LS2: Estado límite de plasticidad cíclica

Ocurre cuando ciclos repetidos de carga y descarga generan fluencia tanto en tensión como en compresión en un mismo punto, causando trabajo plástico continuo en la estructura y, finalmente, fisuración local por agotamiento de la capacidad de absorción de energía del material.

LS3: Estado límite de pandeo

Es la condición en la que la estructura, total o parcialmente, pierde estabilidad debido a las tensiones de compresión o corte, lo que puede conducir al colapso global.

LS4: Estado límite de fatiga

Es la condición en la que la aplicación repetida de ciclos de tensión variable induce la nucleación y propagación de una fisura.

Procedimiento de análisis:

El análisis comienza con la evaluación de los datos de entrada, que incluyen las especificaciones del sistema, las cargas de diseño, las condiciones de borde, la documentación técnica de los componentes y los modelos CAD del sistema.



Figura 2: Diseño asistido por computadora de sistemas del reactor nuclear multipropósito

A continuación, se genera el modelo de elementos finitos de la estructura a partir de la geometría proporcionada, incorporando todas las partes relevantes que representen los elementos del mundo real con la precisión adecuada para el propósito del análisis.

El modelo es sometido a un proceso de verificación y validación conforme a la normativa del proyecto, puesto que, es necesario modelar las estructuras y/o componentes con precisión, evaluar la idoneidad de las técnicas de modelización y garantizar que el modelo es matemáticamente correcto y no contiene errores involuntarios. Los pasos

básicos del proceso de comprobación comprenden principalmente aspectos relacionados a la similitud, verificación de datos de entrada, caracterización de la incertidumbre y robustez, verificación y validación. La normativa proporciona un criterio de puntuación como parte de la evaluación para cada requisito, el cual se compara con un valor mínimo.

A continuación, se analizan los estados límites, indicando el método de análisis que se utilizará, incluidas todas las hipótesis formuladas, las limitaciones del método y los criterios de aceptación. Se colocan en el modelo las condiciones de borde, incluidos los anclajes y otras interfaces.

LS1:

Se aplican en el modelo los diferentes casos de carga correspondientes a las combinaciones de acciones asignadas a las categorías de requisitos A1, A2 o A3.

El análisis estructural para las acciones accidentales relacionadas al sismo, explosión externa e impacto de avión se efectúan en concordancia con la documentación de métodos y criterios adoptadas para el proyecto. Los espectros de respuesta están dados para diferentes puntos de control del edificio, para direcciones horizontal y vertical, y para diferentes valores de amortiguamiento.

El modelo de elementos finitos de la estructura debe representar con precisión la distribución de masas y la rigidez. Para evaluar su comportamiento dinámico, se realiza un análisis modal que permite determinar si la estructura se clasifica como rígida o flexible. En caso de que la estructura sea flexible, el análisis puede abordarse mediante un enfoque estático basado en coeficientes o a través de un análisis dinámico, ya sea mediante espectro de respuesta o historia temporal.

Finalmente se estudian las zonas de tensiones primarias más elevadas con especial atención en las zonas donde las tensiones máximas se dan en todo el espesor de la chapa, para luego comparar estos valores con las tensiones admisibles de los materiales a las temperaturas correspondientes a cada caso de carga. Se excluyen de este análisis las tensiones secundarias debidas a la temperatura, así como las tensiones localizadas en las proximidades de agujeros, soldaduras y otras discontinuidades.

Las uniones soldadas y abulonadas se verifican según los lineamientos establecidos en la ref. [6], considerando el efecto de la temperatura para todos los casos de carga. A partir de los resultados del modelo, se determinan todas las cargas y se comparan con los valores admisibles.

LS2:

Se analizan las variaciones en las tensiones de Von Mises obtenidas en el estudio de fatiga, si no superan el valor admisible, este estado límite se descarta. En caso de que las tensiones sean superiores, se verifica si en un mismo punto se produce una inversión total de tensiones.

LS3:

Para todos los casos de carga analizados en LS1, se incorpora el efecto de la temperatura y se identifican aquellos casos en los que se generan tensiones membranales de compresión o de corte. Para estos casos, se realiza un análisis de pandeo lineal con el fin de determinar el multiplicador de pandeo. Con los datos

obtenidos, se aplica el método de tensiones reducidas, ref. [7], que permite calcular el factor de reducción y verificar si se produce el pandeo.

LS4:

Las estructuras a analizar disponen de una especificación que define las cargas alternadas a considerar durante la vida útil del reactor. Siempre que no se especifiquen requisitos diferentes, el análisis de fatiga se basa en el siguiente número mínimo de ciclos de tensión: Categoría A2: 500 ciclos, Categoría A3: 10 ciclos.

La normativa DIN EN 1993-1-9, ref. [8], establece los límites de las curvas S-N para distintos detalles constructivos. En función de ello, se identifican los detalles constructivos presentes en la estructura analizada.

Se aplican las cargas en el modelo y se determinan los rangos de tensiones. Para mejorar la precisión de los resultados, se generan submodelos en las zonas críticas.

A continuación, se verifica el límite a fatiga, para evaluar si la estructura tiene vida infinita.

Si los rangos de tensiones se encuentran por encima del límite de fatiga (independientemente de la cantidad de ciclos), se procede a verificar el daño acumulado.

El daño acumulado se calcula utilizando la regla de Palmgren-miner según el anexo A de ref. [8].

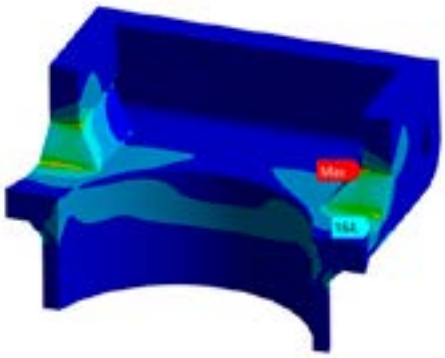


Figura 2: Submodelo: Campo de rango de tensiones

Resultados y Discusión

Los resultados del análisis estructural permitieron evaluar el desempeño de los componentes de las piletas del reactor bajo los distintos escenarios de carga. Se identificaron los factores de seguridad en relación con la plastificación, el pandeo y la fatiga, asegurando que los componentes cumplen con los requisitos establecidos por las normativas aplicables.

Entre los hallazgos más relevantes se destacan:

- Resistencia adecuada de los materiales seleccionados bajo condiciones normales y accidentales.
- Factores de seguridad superiores a los mínimos requeridos en todas las verificaciones de integridad estructural.

- Identificación de zonas críticas con mayores concentraciones de tensiones, proporcionando información clave para mejoras en el diseño.

Conclusiones

El análisis realizado permitió validar el diseño de los diversos componentes de las piletas del reactor y de servicio, asegurando su conformidad con los estándares internacionales de seguridad. El uso del método de los elementos finitos resultó clave para evaluar el desempeño estructural de los elementos sometidos a diversas solicitaciones, garantizando su integridad y confiabilidad.

Los resultados obtenidos respaldan la idoneidad del diseño y constituyen un aporte significativo para la obtención de la licencia de operación del reactor.

Bibliografía

[1] KTA 2502 - Mechanical Design of Fuel Assembly Storage Pools in Nuclear Power Plants with Light Water Reactor.

[2] NEN-EN 1990+A1:2006+A1:2006/C2:2019 - Eurocode 0: Grondslagen vanhet constructief ontwerp, inclusief nationale bijlage NB:2019.

[3] ASME BPVC Section II - ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Materials.

[4] NEN-EN 1993-1-1+C2+A1/NB:2016 - Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen, inclusief nationale bijlage NB: 2016.

[5] NEN-EN 1993-1-6:2007+A1:2017+NB:2011 - Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-6: Algemene regels - Sterkte en Stabiliteit van Schaalconstructies, inclusief A1:2017, correctieblad C1:2009 en nationale bijlage NB:2011

[6] NEN-EN 1993-1-8:2006+C11:2016+NB:2011 - Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen, inclusief correctieblad C11:2016 en nationale bijlage NB:2011

[7] NEN-EN 1993-1-5:2006+A1:2017+NB:2011 - Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-5: Constructieve plaatvelden, inclusief A1:2017 en nationale bijlage NB:2011

[8] NEN-EN 1993-1-9:2006+C2:2009+NB:2011 - Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-9: Vermoeiing, inclusief nationale bijlage NEN-EN 1993-1-9:2006/NB:2011

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE SEGURIDAD ACTIVA Y PASIVA EN VEHÍCULOS DE CATEGORIA L

Lunardelli Damián; Santiso Javier Nicolás; Guaita Lucas Gabriel

UIDET G.E.M.A (Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados) – Calle 116 esquina calle 48, B1900, La Plata, Buenos Aires. guaitalucasgabriel@gmail.com

Introducción

A continuación, se definirá el trabajo llevado a cabo en cada uno de los ensayos realizados. Estos ensayos se corresponden a los solicitados en las leyes argentinas y/o en los reglamentos y normas internacionales para la homologación de vehículos del tipo "motocicletas" definidos también como vehículos de categoría L.

El Laboratorio se encuentra acreditado para la realización de esta serie de ensayos los cuales son necesarios para que las empresas (ya sea fabricantes o importadoras) tramiten ante la autoridad de aplicación la Licencia de Configuración de Modelo (LCM). Una vez que la empresa obtiene la LCM está en condiciones de comercializar el vehículo en el país.

Esta actividad se enfoca en determinar si el vehículo ensayado cumple con la normativa en cuanto a la seguridad tanto del conductor, del pasajero como así también de los peatones.

Los ensayos se aplican a prototipos de vehículos nuevos o a vehículos que ya cuentan con LCM pero que han tenido alguna evolución o variante que pueda alterar la seguridad.

Parte Experimental

Debajo, se detallará una breve descripción de los ensayos para la seguridad activa y pasiva realizados en el laboratorio G.E.M.A:

Prueba de elementos de frenado en pista

Se realiza una prueba en circuito de los dispositivos de frenado de la motocicleta, en ella se determina la distancia de frenado en distintas condiciones, se evalúa freno trasero, freno delantero o ambos al mismo tiempo. Esto se hace bajo distintos regímenes de carga, ya sea solo con conductor o conductor y pasajero. El sistema de frenado se somete a condiciones desfavorables para evaluar su correcto funcionamiento, se ejecuta el ensayo a elevadas temperaturas e incluso con el sistema de frenos mojado. Finalmente se transcriben los resultados en la planilla correspondiente. Los ensayos descriptos se realizan siguiendo los lineamientos del reglamento Nº78 de naciones unidas.

Trazabilidad de los componentes de frenado

Para que quede asentado con que componentes de frenos fueron superadas las pruebas dinámicas, se realiza un relevamiento de todo el sistema. Para esto se desarma el sistema de frenado delantero y trasero para poder catalogar y tomar fotografías de los componentes del sistema de freno a disco o a tambor según corresponda. En el caso de freno a tambor, se examina la trazabilidad de las zapatas y se mide el diámetro del tambor; y para el sistema de freno a disco, se examina la trazabilidad de la bomba, el disco, el cáliper y las pastillas de freno y se mide el diámetro externo del disco de frenado. Por otra parte, las marcas que refieran a la trazabilidad de los componentes mencionados son anotados en la planilla de ensayo correspondiente, las fotografías de los componentes son guardadas en un ordenador como base de datos y luego se procede al ensamble de los mismos para dejar a la motocicleta en su estado inicial.



Figura 1. Trazabilidad de componente perteneciente al sistema de frenado

Trazabilidad de los espejos retrovisores

El objetivo del presente es verificar la instalación de los espejos retrovisores en vehículos de la categoría L según lo especificado en el Decreto Reglamentario 32/2018 Anexo B, siguiendo la Directiva CE 97/24 Capitulo 4, Anexo III.

Este procedimiento comprende los siguientes requerimientos relacionados con la instalación y emplazamiento de los dispositivos de retrovisión:

- Requisitos
- Cantidad
- Ubicación
- Ajuste



Figura 2. Trazabilidad de componente perteneciente a los espejos retrovisores

Trazabilidad de los componentes de acústica

El objetivo del presente es verificar la instalación de los dispositivos de señalización acústica, en todos los vehículos automotores correspondientes a la Categoría L según lo especificado en el Decreto Reglamentario 32/2018 Anexo B, siguiendo el Reglamento Nº 28 UNECE o la Directiva 93/30/CEE.

Este procedimiento comprende los siguientes requerimientos relacionados con dispositivos de señalización acústica utilizados en vehículos de la Categoría L:

- Requisitos
- Ajuste
- Nivel sonoro



Figura 3. Trazabilidad de componente perteneciente a los espejos retrovisores

Trazabilidad de los componentes de iluminación

Para los ensayos del sistema de iluminación, se verifican los ángulos de dispersión de las fuentes iluminantes. Para ello, se emplean instrumentos calibrados mediante los cuales se toman medidas de los ases de luz en dirección vertical y horizontal. Por otra parte, se desensamblan las fuentes de iluminación de la motocicleta para su catalogación y búsqueda de marcas de homologación para verificar su trazabilidad, en donde al mismo tiempo se toman fotografías de los mismos para tener un registro visual.

Se identifica la marca de fabricación, modelo y homologación de los mismos para verificar si cumplen con las normativas y se corroboran con los certificados atribuidos por el fabricante para verificar que están apropiadamente catalogados. Finalmente, los resultados se vuelcan en la planilla correspondiente y se instalan nuevamente para que la motocicleta recupere su estado inicial. Estos ensayos siguen los lineamientos del reglamento Nº53 de naciones unidas.



Figura 4. Trazabilidad de componente perteneciente al sistema de iluminación

Ensayo de salientes exteriores

Para controlar los salientes exteriores del vehículo se utiliza un dispositivo de ensayo que se ajuste a las especificaciones establecidas en la Figura 1. El vehículo está dispuesto en posición vertical sobre una superficie horizontal. Dicho esto, el dispositivo se desplaza desde la parte delantera hacia la parte trasera de la motocicleta, en un movimiento suave, a ambos lados de la misma. Si el dispositivo de ensayo entra en contacto con algún saliente de ésta, dicho saliente será medido y se determina si cumple o no con las especificaciones de la norma.

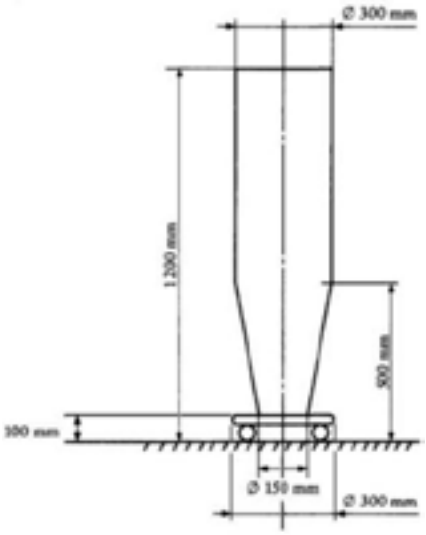


Figura 5. Dispositivo de ensayo para salientes exteriores.

En este ensayo también se analizaron componentes del vehículo que no alcanzan a entrar en contacto con el dispositivo.

Dispositivos de protección contra la utilización no autorizada

Antes de comenzar este ensayo, se debió efectuar verificaciones preliminares para determinar el tipo de sistema de protección para evitar la utilización no autorizada que posee el vehículo. El ensayo consiste en la verificación de los requisitos generales y los requisitos particulares. Dentro de los requisitos generales, en algunos ítems se examinó el funcionamiento del dispositivo de protección, se verificó que sea necesario desactivarlo para dirigir el vehículo en línea recta, que sea difícil de desarmar o romper con herramientas o instrumentos de uso común, que sea activado con una sola llave.

Por otra parte, existe otra evaluación que se lleva a cabo con la utilización de un torquímetro en la que que el dispositivo de protección accionado debe resistir una aplicación de un determinado par (torque) en Nm.

Depósito de combustible metálico

En primer lugar, para este ensayo se retira el tanque de combustible de la motocicleta para poder realizar los ensayos. Luego, se realizan ensayos de vuelco y una evaluación de presión interna.

Para el ensayo de vuelco, el depósito de combustible se coloca sobre un soporte de ensayo en la misma posición en la cual está instalado en la motocicleta, en donde el soporte está diseñado de forma tal que puede girar en torno a un eje paralelo al eje longitudinal del vehículo. El ensayo se ejecuta con el tanque a un porcentaje específico de su capacidad nominal total con un líquido no inflamable de propiedades características similares a las del combustible. Una vez el tanque dispuesto en posición y con la determinada cantidad del fluido, se rota 90º hacia la izquierda y permanece en esa posición un tiempo especificado por la norma. Pasado este tiempo, se rota nuevamente en la misma dirección hasta completar los 180º y se mantiene durante la misma cantidad de tiempo. Aparte, en el ensayo de presión interna, el tanque debe ser sellado en todos los orificios y luego se verifica la presión interna especificada ejercida, mantenida como mínimo por un tiempo determinado, y se comprueba que no existen grietas, fugas o deformaciones durante el ensayo.

Dispositivos de retención

En las motocicletas, los dispositivos de retención es lo que respecta a los reposapiés y asideros. En todos los vehículos dotados para transportar un acompañante, éste debe estar equipado con asideros los cuales pueden constar de una correa o dos barras en la que pueden agarrarse. El ensayo consiste en aplicar cargas a los dispositivos y verificar que estos resistan las fuerzas ejercidas.

Por otra parte, e primera instancia, se verificó la existencia y tamaño de ambos reposapiés (izquierdo y derecho) de conductor y pasajero, aparte de la existencia de los asideros. Esta tarea también incluye constatar que no haya ningún elemento del vehículo que pueda confundirse con los dispositivos de retención.

Caballetes

Todas las motocicletas disponen de al menos un caballete, por lo general en el lateral izquierdo. En otros casos, también están equipadas por un caballete central.

En este ensayo, se verifica que estos dispositivos están provistos de sistemas de retención que los mantengan en la posición que ocupan cuando no son utilizados. Aparte, se verifica si el cada caballete consta de dos dispositivos independientes (por ejemplo: dos muelles) o alternativamente de un único dispositivo. Si el caballete posee solo un dispositivo (un resorte), entonces éste deberá funcionar sin fallos durante una cantidad determinada de ciclos.

Aparte, se realiza un ensayo de estabilidad de caballetes en una plataforma llana, rectangular y de dimensiones suficientes para sostener íntegramente el vehículo en posición de estacionamiento. Dicha plataforma debe adoptar posiciones longitudinales y transversales que simulan diferentes inclinaciones.

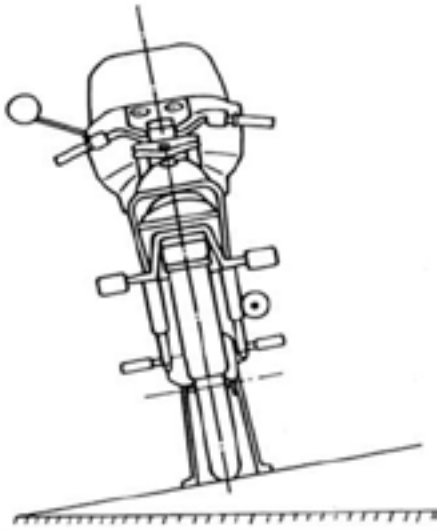


Figura 6. inclinación transversal hacia la izquierda del caballete central.

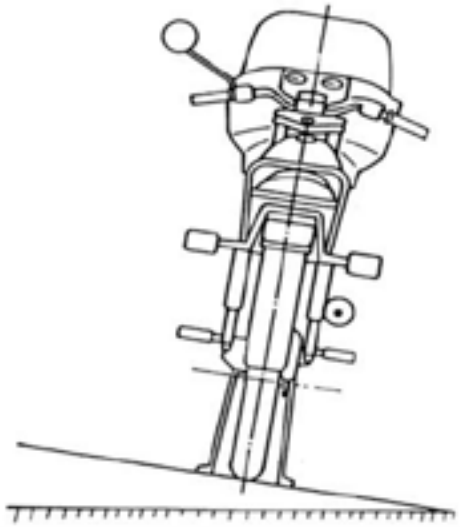


Figura 7. inclinación transversal hacia la derecha del caballete central.

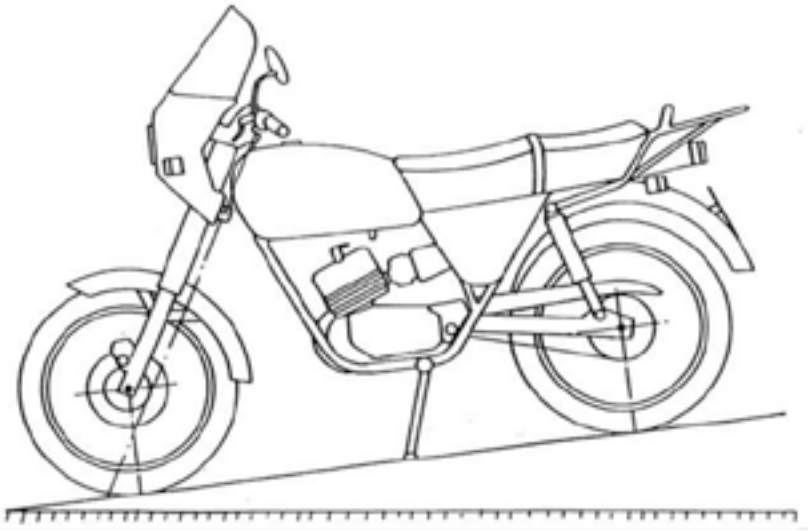


Figura 8. inclinación longitudinal hacia abajo caballete lateral.

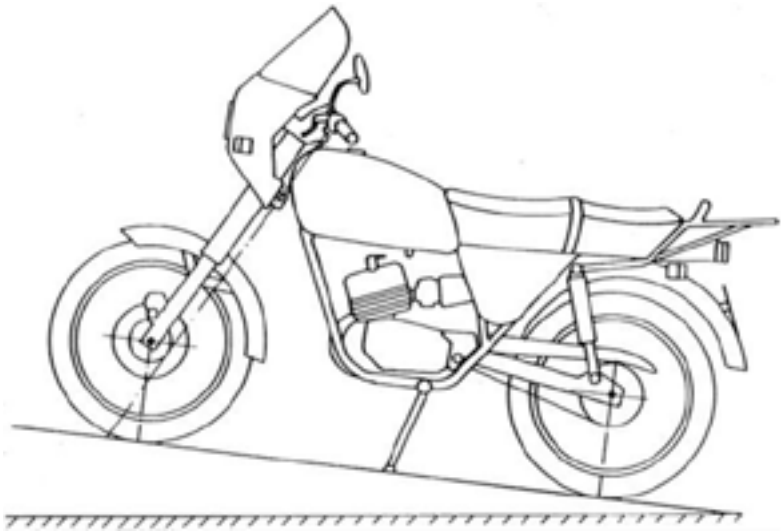


Figura 9. inclinación longitudinal hacia arriba caballete lateral.

Confección de informes técnicos
Para cada ensayo realizado se realizaron informes en los cuales se especificaron si la motocicleta verifica o no verifica con todos los ensayos realizados.

Resultados y discusión
Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas muestran un cumplimiento adecuado de las normativas y estándares internacionales para las motocicletas, tanto en los sistemas de frenado como en los de iluminación. Las pruebas dinámicas del sistema de frenado permiten comprobar la eficiencia de los frenos en diferentes condiciones de carga, lo que es fundamental para garantizar la seguridad sobre el vehículo. Además, la trazabilidad de los componentes se realiza de manera rigurosa, permitiendo una verificación completa de los sistemas involucrados.
En cuanto al sistema de iluminación, las mediciones de dispersión de la luz y la verificación de las fuentes de iluminación aseguran que la motocicleta cumple con las exigencias de visibilidad y seguridad para el conductor.

Conclusiones
Por medio del presente trabajo se puede concluir que las aplicaciones de estos ensayos son importantes para la integridad física de las personas. Aunque todos los elementos de seguridad tienen como finalidad que el motorista resulte ileso cuando circula, los accidentes pueden ocurrir y esto atenta contra la salud tanto de los pasajeros de la motocicleta como la de terceros.

Bibliografía

- Ley 24449 (Ley Nacional de Transito – Año 1995 con actualizaciones)
- Decreto Reglamentario 32/2018, Modificación del Decreto N°779/1995 (La ley de transito fue acompañada en 1995 del decreto reglamentario 779/1995. En el año 2018 se publicó un nuevo decreto, el 32/2018 que incorpora gran cantidad de modificaciones debidas mayormente a la continua evolución del parque automotor)
- Disposición Nacional 408/2010. Esta disposición del 2010 es la que indica la obligatoriedad de que la luz baja se encienda de forma automática en los vehículos.
- Directiva CE 97/24 Capitulo 4 Anexo III. Esta Directiva de la Comunidad Europea publicada en 1997 establece los lineamientos en cuanto a la instalación de los espejos retrovisores. Dimensiones, altura, campo de visión, etc.
- Directiva CE 93/30 Anexo II. Publicada en 1993 establece los requisitos de instalación del avisador acústico, comúnmente llamado bocina.
- Reglamento Nº 28 UNECE Enmienda 5. Tambien establece requisitos para el avisador acústico. Publicada en 1972 pero se actualiza permanentemente. La ultima enmienda fue en el 2018 y hay una en preparación.
- Reglamento Nº 53 UNECE rev03 con corrección Nº1. Establece los requisitos generales y de instalación de los dispositivos de iluminación y señalización. En continua evolución. Su ultima modificación es del año 2024.
- Reglamento Nº 60 UNECE rev01. Corresponde a los requisitos en cuanto a los controles, testigos, ideogramas, etc. y su última modificación es de 2006.
- Reglamento Nº 74 UNECE rev02. Al igual que el Reglamento Nº53 establece los requisitos del sistema de iluminación pero en este caso se enfoca a la subcategoria L1 que son motos de cilindrada menor o igual a 50 cc también conocida como ciclomotores.
- Reglamento Nº 78 UNECE rev02. Establece los requisitos en cuanto al sistema de frenos. Tipos, requisitos de distancias de frenado, desaceleraciones, métodos de ensayos, etc. En continua evolución. Su última enmienda es del año en curso.

SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN EL DESARROLLO DE UNA URBANIZACIÓN SUSTENTABLE

Marañón Di Leo, Julio[a,b]; Delnero, Juan Sebastián[a,b] y Gamarra, Ariel Nicolás[a]

[a]*Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia – Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET-LaCLyFA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina.*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Avenida Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.*
E-mail: jmaranon@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética plantea nuevos retos de la ingeniería buscando que la tendencia al crecimiento de los centros urbanos vaya de la mano con iniciativas sustentables que mejoren la vida de la población y reduzcan el costo energético, apuntando además a la reducción de la huella de carbono mejorando la calidad del ambiente. En función de ello es conocido el empleo de sistemas de generación de energía renovable, en busca de estos objetivos. Entre ellos se encuentra el aprovechamiento de la energía eólica, la cual se aplica en gran escala mediante el empleo de granjas eólicas. Pero ciertos aspectos de dicha actividad reducen su empleo en las ciudades, entre ellos los efectos del ruido, las posibles vibraciones de los sistemas, la estética y la integración en el entorno urbano de las mismas. Por otro lado, estos sistemas son afectados por las características del viento (frecuencia, dirección, velocidad, intensidad de turbulencia, etc.) y su dependencia respecto de la configuración y ordenamiento de las edificaciones y vías de tránsito. Los distintos sistemas empleados habitualmente requieren ciertas condiciones particulares del viento incidente, que los hacen aplicables o no en función de los aspectos mencionados. El presente trabajo tiene por objeto mostrar los sistemas de generación eólica urbana conocidos y sus diferentes condiciones de funcionamiento, y por otro lado tecnologías y consideraciones en el desarrollo actual de estos sistemas para lograr una mejor eficiencia en su aplicación en el entorno urbano. La energía eólica a pequeña escala ofrece nuevas oportunidades para la producción descentralizada de electricidad, evitando la dependencia del servicio de la red urbana y las pérdidas por transmisión. Entre las ubicaciones viables dentro del entorno urbano, los edificios altos son especialmente prometedores debido a su elevada altura y a las condiciones menos turbulentas del viento. También pueden integrarse en la arquitectura del edificio o como unidades independientes en el entorno urbano. Entre estos casos es posible su implementación en edificaciones bajas, según sus posibilidades, orientación y entorno, ofreciendo la posibilidad de energía alternativa para distintas aplicaciones. En todos los casos, es imprescindible un análisis completo de las características del viento en la locación del dispositivo, para un adecuado aprovechamiento del recurso eólico. La evolución del sector eólico mundial es ascendente, tanto en nuevos MW añadidos a la capacidad total como en energía eléctrica generada a partir de instalaciones eólicas. La capacidad eólica terrestre (onshore) ha aumentado un 298%, añadiendo unos 530 GW en el periodo 2010-2020. Se han añadido 32 GW a la capacidad total marítima (off shore) durante el mismo periodo, aumentando su capacidad global en más de un 1000%. En 2023 se añadieron 116,6 GW de nueva capacidad eólica a la red eléctrica mundial, un 50% más que en 2022 (Fig. 1), lo que eleva la capacidad eólica total instalada a 1.021 GW, con un crecimiento del 13% respecto al año 2023. Las nuevas instalaciones en el mercado eólico onshore superaron el hito de 100 GW, mientras que la nueva capacidad eólica offshore puesta en servicio el año pasado alcanzó casi 11 GW, lo que convierte a 2023 en el segundo año más alto de la historia en cuanto a nuevas instalaciones eólicas terrestres y marinas, respectivamente (Fig. 2). La tendencia al alza predomina en el sector eólico para las proyecciones de las próximas tres

décadas. Entre los años 2030 y 2050, la capacidad total se triplicará y se multiplicará por diez, respectivamente, en comparación con 2019.

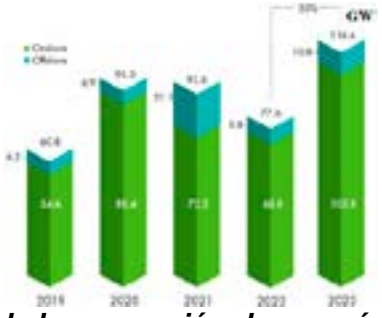


Figura 1: Evolución anual de la generación de energía eólica en el mundo. [1].

A pesar del desarrollo exponencial del sector eólico, la penetración en el entorno urbano es inapreciable. Las principales barreras a la implementación de la energía eólica urbana pueden caracterizarse en función de factores tecnológicos, sociales, medioambientales y económicos [2]. El socioambiental, sería el impacto visual y las molestias acústicas que generan poca aceptación social, y la seguridad para la fauna (aves); el aprovechamiento del recurso eólico en función de metodologías de predicción energética basadas en la evaluación del recurso eólico; y los factores económicos basadosen la baja viabilidad de las instalaciones.



Figura 2: Evolución acumulada de la generación de energía eólica en el mundo. [1].

El rendimiento de los sistemas eólicos urbanos está estrechamente relacionado con la ubicación de las turbinas. Balduzzi y otros [3] investigaron la proximidad de los edificios a través del perfil vertical del viento para diferentes alturas de edificio y geometrías del tejado, y descubrieron que se podía conseguir un aumento de más del 70% de la capacidad según estudios previos del potencial eólico. Dilimulati y otros [4] y Toja-Silva y otros [5] demostraron que las turbinas con mejor rendimiento en entornos urbanos son las turbinas eólicas de eje vertical, pero es necesaria una mayor optimización para aplicaciones urbanas. Dilimulati y otros [4] explicaron que los difusores y las cubiertas alrededor de los aerogeneradores convencionales pueden aumentar considerablemente la potencia. Al-Quraan y otros [5] estudiaron el potencial de la energía eólica en dos zonas, con un despliegue urbano homogéneo y no homogéneo en cuanto a las alturas de los edificios. Las desviaciones entre los cálculos energéticos de la zona homogénea resultaron ser del 5%, mientras que las desviaciones de la zona no homogénea fueron superiores al 20%.

DESARROLLO

El estado del arte del análisis de la aplicabilidad de sistemas eólicos de generación de energía requiere, en primera instancia un análisis de la ubicación y emplazamiento del o los dispositivos a emplear con el fin de establecer qué tipo de sistema es el más adecuado para la utilización propuesta. El primer paso a llevar adelante para definir el sistema es el de realizar un análisis del potencial eólico en el emplazamiento [7][8], mediante datos meteorológicos estadísticos de las características del viento en el lugar, y en caso de no contar con la información suficiente, realizar un relevamiento de vientos en la zona, es decir un estudio del potencial eólico, para lo cual se requieren mediciones in situ por un tiempo prolongado, que

como mínimo es de un año, siendo recomendado un tiempo de 10 años en función del objetivo de la propuesta, realizando la medición del viento en la locación. Se miden velocidades medias y máximas del viento con una frecuencia determinada, su direccionalidad, etc. A partir de ello se pueden establecer las condiciones eólicas del emplazamiento y finalmente el potencial eólico existente. Luego se puede realizar una selección del tipo de equipo de aerogenerador más adecuado, realizando los análisis económicos correspondientes con el fin de establecer la viabilidad del proyecto propuesto. El objetivo de este trabajo no se centra en todos los aspectos mencionados, si no en los análisis a realizar habiendo superado esta etapa de aplicación y fundamentalmente, en lo que respecta a los análisis que son requeridos, para la implementación de un aerogenerador en el entorno urbano.



Figura 3: Ejemplos de aerogeneradores HAWT (izq.) y VAWT (der.)

El principio de funcionamiento de los aerogeneradores, en general, se basa en la captación de la energía cinética del viento a partir de lograr que un rotor gire por su acción, logrando luego de esa manera transformar dicha energía mediante un sistema mecánico que logre accionar un generador eléctrico, permitiendo de esa forma transformar la máxima energía cinética del viento en energía mecánica y posteriormente traducirla en energía eléctrica aprovechable. En este proceso los sistemas comúnmente empleados utilizan una geometría determinada para absorber dicha energía del viento y transformarla en movimiento mecánico. Desde los primeros tiempos, el sistema básico se planteaba mediante un rotor movido por el viento, que tenía dos formas básicas de girar respecto a un eje, el caso de eje horizontal respecto al suelo y el caso del eje vertical respecto al suelo, así surgen los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) y aquellos de eje vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine) (Fig. 3), de los cuales hay variantes en función de las formas geometrícas del rotor. Estos sistemas pueden variar en el principio físico que logra el movimiento del rotor con el viento, algunos emplean el concepto de la fuerza de sustentación (optimizada en función de la geometría) o la de resistencia del aire, los cuales resultan menos eficaces y eficientes que los anteriores. Sin embargo, en la actualidad han surgido nuevos conceptos, que no se basan estrictamente en un rotor. En particular, se encuentra en desarrollo experimental, un nuevo sistema basado en el desprendimiento del flujo sobre una geometría particular. Específicamente, en base a las calles de desprendimiento de flujo de Von Karman, generadas por el desprendimiento de vórtices secuenciales a sotavento de un cilindro embestido por el viento. Estos vórtices desprendidos a una frecuencia particular dependiendo de la geometría, rugosidad del cilindro y magnitud de la velocidad del viento, logran generar un movimiento oscilatorio del mismo que puede ser utilizado en la base de este con el fin de generar energía (Fig. 4, Bladeless).



Figura 4: Sistemas de generación basados en Bladeless y encauzadores de flujo.

Pero, este sistema de generación no es el único que se está desarrollando actualmente. Existen otros dispositivos basados en el concepto de concentración del flujo de aire que los enviste, principalmente basados en el concepto de la Ley de Bernoulli, es decir encauzadores que aceleran el flujo obteniendo mayores velocidades del viento o logrando zonas de succión, mediante los cuales logran mover el rotor de una máquina eléctrica en su interior generando

energía (Fig. 4). Todos estos dispositivos muestran una gran proyección para su empleo en zonas urbanas y edificaciones, al no poseer elementos móviles externos, con las consecuentes problemáticas ya mencionadas en los sistemas actuales.

Ante la necesidad de la evaluación de cualquiera de los sistemas de generación eólica mencionados precedentemente, en algunos casos resulta necesario el análisis de sus características aerodinámicas con el objeto de establecer sus condiciones de eficiencia en la capacidad de generación de energía, principalmente la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica con el fin de accionar un sistema de generación de energía eléctrica, en términos generales. Particularmente, en muchos casos, es necesario analizar el comportamiento del dispositivo en estudio en función de las particularidades de las condiciones del viento en su emplazamiento. Para ejemplificar, no será igual un HAWT ubicado en un terreno llano y limpio de obstáculos, que en uno con elementos de rugosidad superficial que modifican el flujo de aire que incide sobre el aparato (ráfagas, turbulencia, cortantes de viento, etc.). En muchos casos, se requiere, para un análisis de la respuesta del dispositivo, una evaluación aerodinámica resultante de las posibles perturbaciones del flujo de aire que lo afecten. Es por ello que, en estos casos, se requiere un estudio de estos fenómenos. La forma de encarar el problema tiene, en términos generales, tres posibles planteamientos, a saber: mediciones en túnel de viento, simulaciones numéricas y evaluaciones in situ. El primero de los casos requiere el planteamiento de un modelo en escala o no, que en términos cualitativos pueda establecer el comportamiento del dispositivo bajo distintas configuraciones del viento. En algunos casos, en función del tamaño del aerogenerador es posible un análisis de este a escala real en el túnel de viento, esto presenta una gran ventaja porque se puede realizar un análisis exhaustivo del aparato en distintas condiciones controladas del flujo de aire sobre el mismo, permitiendo someterlo a variadas condiciones de flujo. En estos casos, además de poseer un túnel de viento e instrumental adecuados para los estudios, se requiere una alta capacitación y experiencia en el personal que realiza este tipo de trabajo experimental, por la complejidad inherente en ensayos experimentales de este tipo. En el caso de simulaciones numéricas, es decir lo que se conoce comúnmente hoy día como Mecánica de los Fluidos Computacional, con sus siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics), se plantea la solución de las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido (Ecuaciones de Navier-Stokes). Esta resulta una herramienta muy poderosa, en términos de análisis, diseño y proyecto. En términos generales, la gran problemática de dicha metodología se presenta en la necesidad de lograr una validación de los modelos empleados con el fin de certificar los resultados obtenidos, luego de lo cual permite una gran variabilidad de cambios en el modelo y las condiciones que la hacen poderosa al momento de realizar diversos análisis. Por otra parte, el empleo de los códigos de programación, sean propios o comerciales requiere de una alta capacitación y experiencia para lograr los resultados adecuados. Por último, el análisis in situ, está limitado a casos particulares, que no refieren a un anteproyecto, si no a la necesidad de realizar mediciones de equipos emplazados en los cuales surgen problemáticas inherentes a alguna condición del flujo incidente que provoque condiciones no satisfactorias de operación, por ejemplo. Es habitual, en análisis del flujo de viento, evaluar el comportamiento de este cuando enviste diferentes geometrías u obstáculos. Es de primordial importancia en cualquier estudio fluidodinámico establecer y conocer las características del campo del flujo en el entorno de diferentes geometría y configuraciones geométricas, con el fin de establecer en forma correcta la configuración fluidodinámica global en las áreas de estudio establecidas. Al respecto, podemos mostrar, como ejemplo el caso bidimensional y tridimensional del flujo que enviste un cuerpo típico con bordes o aristas filosas, que representa un caso genérico de una vivienda o edificación en altura. (Fig. 5). Allí se observa que el flujo de aire se separa o desprende de la superficie en los bordes agudos y ello conlleva a una conformación particular del fluido corriente abajo, generando zonas de recirculación y estelas turbulentas que cambian el viento que incide sobre los objetos que se encuentren detrás de estos obstáculos. Dicha condición es característica, y debe de ser evaluada en función de la posición relativa que tiene el emplazamiento de un aerogenerador, puesto que cambia la eficiencia con la cual fue diseñado. Es por ello que, en el análisis de un posible emplazamiento, y mediante las técnicas

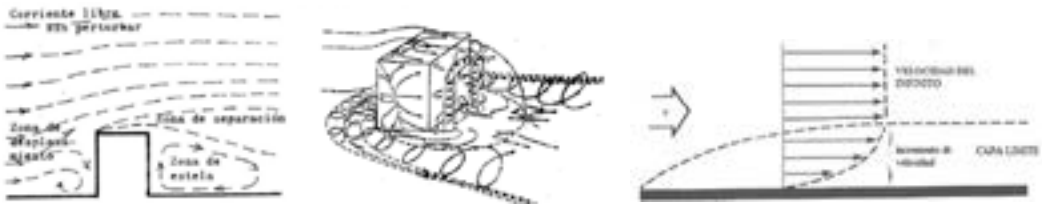


Figura 5: Esquemas de las características cualitativas del flujo de aire en el entorno de un obstáculo típico representativo de una edificación y la capa límite.

mencionadas, es necesario un estudio de la configuración fluidodinámica del entorno del emplazamiento en función, no solo de estos efectos sino de la direccionalidad e intermitencia del viento según las características de la zona. Otra característica de importancia, en lo que respecta a la configuración del fluido en movimiento es el concepto de capa límite, es decir que el viento, en las cercanías de una superficie, no sigue un perfil uniforme, debido a la viscosidad de este se genera un gradiente de velocidades en altura. En función de la viscosidad del aire, su densidad y la rugosidad superficial se genera una zona denominada capa límite que se extiende una cierta altura, a partir de la cual el viento no es influenciado por la proximidad a la pared (Fig. 5). En términos generales la capa límite, para estos estudios varía mucho con las condiciones de la rugosidad superficial, por lo cual y para las condiciones de rugosidad del suelo terrestre en la Fig. 6 se pueden apreciar esquemas de algunas condiciones típicas.

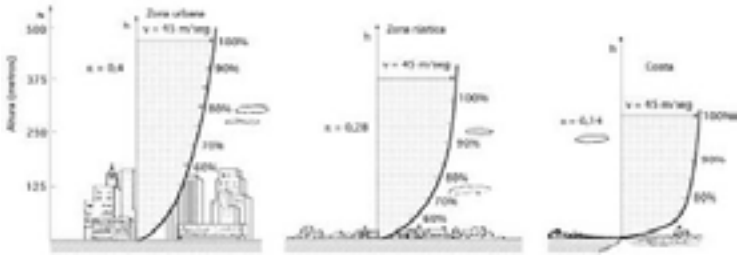


Figura 6: Esquemas de capas límite típicas para diferentes topografías.

Luego, las configuraciones, que dependen de las geometrías involucradas podrán ser más complejas, considerando un conjunto de elementos, lo cual constituiría un entorno de simulación urbana. Estas condiciones, resumidas aquí, muestran a las claras la compleja situación del flujo de aire en un entorno urbano, lo cual hace bastante compleja la elección y proyecto de instalación de una máquina en el entorno de una edificación. Como refieren diferentes autores, y es de conocimiento para especialistas en el tema, la mejor ubicación para un aerogenerador es aquella que reciba un viento libre con las mínimas perturbaciones posibles con el fin de lograr extraer la máxima energía obtenible del viento, de acuerdo con sus capacidades propias de diseño. En estas condiciones, la ubicación de un aparato sería deseable en un espacio abierto a nivel del suelo sin grandes edificaciones en su entorno (por ejemplo un parque), o en zonas edificadas, en altura sobre las cubiertas de edificios o viviendas, aunque también sería posible localizarlos en ubicaciones urbanas donde las condiciones del viento, en función de la geometría y las características de direccionalidad y frecuencias del viento (según los estudios eólicos de potencial pertinentes) establezcan las ubicaciones más adecuadas para lograr alcanzar la máxima eficiencia posible del aparato en cuestión. Mostramos algunos ejemplos típicos de configuraciones básicas que se pueden presentar en un entorno urbano y algunos ejemplos reales. En primera instancia, como se mencionó en un principio, y a partir de los conceptos indicados previamente, la mejor condición de operación para un aerogenerador en un entorno urbano es en altura, específicamente sobre la cubierta de edificaciones, o en su defecto ubicado en alguna posición en la que los efectos de encauce del aire optimizarían su funcionamiento (Fig. 7 y 8). Por otra parte, como se mencionó, para tener mejores condiciones del flujo incidente sobre los aerogeneradores se pueden buscar locaciones de instalación abiertas o semi abiertas donde los efectos de las rugosidades sean mínimos permitiendo un mejor aprovechamiento eólico de los aparatos instalados (Fig. 9). Resumiendo, las posibilidades para la instalación

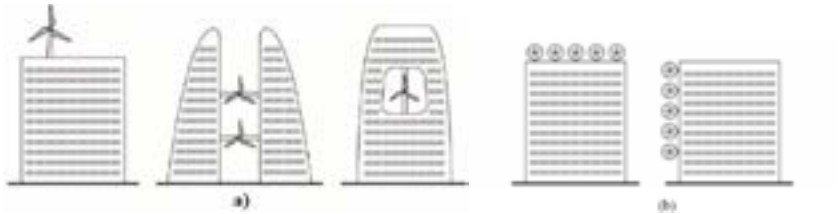


Figura 7: a) grandes aerogeneradores integrados a la edificación. b) pequeños.



Figura 8: Aerogeneradores sobre edificaciones.



Figura 9: En zonas abiertas y en las inmediaciones de un canal. [10]

son variadas, pero tienen una gran dependencia de variados factores, del entorno, de las características particulares del viento en la urbe (direcciones, frecuencias, valores medios y máximos, turbulencia, etc.), por lo cual, en casi todos los casos se requiere un análisis y estudio previo específico para determinar la mejor ubicación y tipo de aparato posible a implementar. Por otra parte, no hay que dejar de lado las reglamentaciones y normas establecidas en la zona, que pueden estar disponiendo limitaciones y condiciones a cumplir para la instalación de estos sistemas de generación de electricidad, incluyendo las posibilidades de su uso particular o vinculado al sistema del servicio de red eléctrica pública, por lo cual tendría un efecto económico más interesante aún.

CONCLUSIONES

En conclusión, este trabajo tiene como objeto proporcionar un resumen del estado actual de la implementación de aerogeneradores en entornos urbanos, subrayando la importancia de los parámetros fundamentales para una instalación eficiente. La adecuada consideración de estos parámetros es esencial para optimizar la explotación del recurso eólico y avanzar hacia un entorno urbano sostenible. Aunque no hemos pretendido ofrecer una guía exhaustiva para el desarrollo de proyectos, los conceptos presentados son cruciales para el éxito de las instalaciones de aerogeneradores. La evolución y mejora de los sistemas de generación eólica apuntan a un futuro prometedor en los centros urbanos, destacando su potencial para enriquecer la calidad de vida y contribuir al bienestar ambiental en las ciudades.

Este análisis no solo refuerza la viabilidad y el impacto positivo de la energía eólica en entornos urbanos, sino que también abre la puerta a futuras investigaciones y desarrollos en este campo, orientados hacia un desarrollo urbano Integrado, ecológico y eficiente.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado en el marco de las actividades correspondientes al proyecto PICT2019-00570, con el objeto de definir las condiciones a determinar para la implementación especial de sistemas de aerogeneradores en zonas urbanas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] GWEC (2024). *Global Wind Report 2024*. Technical Report; Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium.

[2] IRENA (2021). *Rise of Renewables in Cities: Energy Solutions for the Urban Future*; Technical Report; International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates.

[3] Balduzzi, F.; Bianchini, A.; Carnevale, E.A.; Ferrari, L.; Magnani, S. (2012). Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building. *Appl. Energy*, *97*, 921–929.

[4] Dilimulati, A.; Stathopoulos, T.; Paraschivoiu, M. (2018). Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, *175*, 179–192.

[5] Toja-Silva, F.; Colmenar-Santos, A.; Castro-Gil, M. (2013). Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions-Opportunities and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *24*, 364–378.

[6] Al-Quraan, A.; Stathopoulos, T.; Pillay, P. (2016). Comparison of wind tunnel and on site measurements for urban wind energy estimation of potential yield. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, *158*, 1–10.

[7] Yildiz, S.S. (2023). Determining Wind Energy Potential Using Geographic Information System Functions: A Case Study in Balıkesir,Turkey. *Appl. Sci., 13, 9183*.

[8] Ding, Y. (2019). *Data Science for Wind Energy* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC Press, London.

[9] Park, J.; Jung, H.-J.; Lee, S.-W.; Park, J. (2015). A New Building-Integrated Wind Turbine System Utilizing the Building. *Energies, 8, 11846-11870*.

[10] Beller, C. (2011). Urban Wind Energy. *Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Risø-PhD No. 89(EN)*

PUESTA EN VALOR, REACONDICIONAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA DE UN MOTOR A REACCIÓN ROLLS ROYCE ALLISON 250-C20B

Santiago Pezzotti[a], Mariano Burdet[b], Juan Ignacio D'Iorio[a], Joaquín Piechocki[a]

[a]Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[b]Departamento de Ingeniería Aeroespacial, 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

Palabras claves: motor a reacción, jet, turboeje

Introducción

El motor turboeje Allison serie 250 es uno de los motores más utilizados en la industria aeronáutica, principalmente para la propulsión de helicópteros. Diseñado en la década del '60 por la *Allison Engine Company,* es un motor de referencia mundial que ha permitido que se siga desarrollando en la actualidad (desde la década del '90 por la *Rolls Royce Company*) y equipe helicópteros como el MBB BO105, Augusta A109A, Hughes OH-6, MD500, entre otros; también es utilizado en aviones y motonáutica.

El Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la FI de la UNLP poseía una unidad para ser utilizada con fines didácticos. Para ello se diseñó un banco de ensayo que permite montarlo, equiparlo con los sistemas básicos del motor (aceite, combustible, aire, eléctrico) e instrumentarlo para medir los parámetros básicos de funcionamiento: temperaturas, presiones, caudales y velocidades de giro.

El presente trabajo detalla el desarrollo de la planificación y la ejecución de las tareas de construcción, instalación de sistemas, restauración mecánica y puesta a punto, juntamente con el del banco de motores que permite la función didáctica. Se describen los sistemas, los problemas asociados y las pruebas requeridas para el correcto funcionamiento.

Con la convicción de que la formación en ingeniería necesita de ensayos de laboratorio que permitan al alumnado tomar conocimiento práctico del funcionamiento de los motores a reacción, orientado a la generación de competencias, es que este proyecto ejecutado simboliza la apuesta sostenida al desarrollo industrial argentino desde nuestro lugar de educadores e ingenieros.

Contexto

A partir de una donación, el Departamento de Ingeniería Aeroespacial recibió un motor turboeje Allison 250-C20B para ser utilizado con fines didácticos por la cátedra de Motores a Reacción de la carrera.

El motor posee las siguientes especificaciones técnicas:

- Origen: Inglaterra (Rolls Royce Company)
- Tipo: Turboeje
- Compresor: Combinado de 6 etapas axial y 1 etapa centrífuga
- Relación de compresión: 7,2:1
- Caudal másico de aire: 3,8 lb/s (1,7
- Turbina: 4 etapas axiales (2 produc ases (compresor) y 2 de potencia (libre))
- Cámara de combustión: Can Type (verso

- Potencia máxima (Take Off): 420 sHP
- SFC (Take Off): 0,65 lb/hr/sHP
- Peso: 161 lb (76 kg)
- Relación Potencia/Peso: 2,6:1 sHP/lb



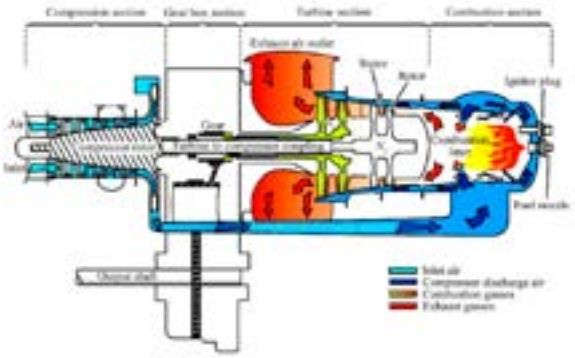


Figura – Esquema de componentes y recorrido del aire en el ciclo de funcionamiento

La puesta en funcionamiento de la unidad requirió el desarrollo y construcción de un soporte móvil orientado a la función didáctica y operativa, la verificación y evaluación de los componentes críticos, determinación de los sistemas faltantes (lubricación, combustible, eléctrico, bleed), diseño y construcción de un tablero de mediciones para su operación y, finalmente, el diseño de procedimientos de puesta en marcha y operación en general desde la perspectiva de la seguridad.

Desarrollo

El trabajo se desarrolló por etapas basados en diseños de instalaciones y sistemas, construcción de soportes, instalación de sistemas propios del motor, verificaciones técnicas y análisis previos a la puesta en marcha.

Diseño y construcción del Banco soporte

En busca de obtener practicidad en los trabajos de verificación y análisis de componentes, se resolvió que lo primero era tener montado el motor en un banco que lo soporte y que sea además el mismo que se vaya a emplear para el funcionamiento.
Se construyó un banco diseñado de forma tal que se utilicen los anclajes propios del motor y que además permita montar todos los sistemas de forma cómoda. A su vez, dicho banco posee una estructura para montar el tablero de instrumentos para la puesta en marcha y que los alumnos puedan verificar parámetros de funcionamiento en prácticas de laboratorio.



Figura – Banco construido con el motor instalado

Verificaciones técnicas de conjunto de compresores, turbinas y cámara de combustión

Una vez construido el banco y montado el motor se procedió a realizar una revisación de los componentes principales del motor: compresores, cámara de combustión y turbinas.
En cuanto al sistema de compresores, se desarmó el conjunto de compresor axial para realizar una revisación visual de los álabes tanto de la parte rotora como estatora. Para esto se fabricaron herramientas especiales ya que no se disponía de las originales. Se pudo observar que no había fisuras ni desgaste que comprometa el funcionamiento.
En tanto que el compresor centrífugo no fue revisado por ser un sistema más robusto que el anterior y que por sucesión de inspección si el primero no presenta problemas, este tampoco.



Figura – Conjunto de compresor axial. Rotor (izquierda) y estator (derecha)

Para el caso de la cámara de combustión, también se procedió al desarmado de la misma y se realizó una inspección ocular. Se revisó el interior del Case y el Tubo de Llama de manera exhaustiva buscando fisuras y no se encontró nada que perjudique el funcionamiento.



Figura – Case y Tubo de Llama (Linner) de cámara de combustión

Finalmente se realizó una boroscopía al conjunto de turbinas, ya que el acceso a las mismas implica un desarme complejo con herramientas especiales y repuestos de cambio obligatorio,

que no se disponen. Al igual que en los casos anteriores, no se encontró ningún componente comprometido para el futuro funcionamiento. Tanto las ruedas de turbina como los estatores se encontraban en buenas condiciones.



Figura – Boroscopía a álabes de turbina (N1)

Análisis, evaluación, relevamiento e instalación de los sistemas del motor

Una vez revisado los componentes principales se procedió a la contrastación de los elementos y sistemas propios del motor contra los manuales IPC (Ilustrated Parts Catalog) y MM (Maintenance Manual). De esta forma se determinó como se debían instalarse los siguientes sistemas:

- Sistema de arranque (starter, instalación eléctrica)
- Sistema de combustible (unidad de combustible, bomba, cañerías, filtros, sensores, controles, instalación eléctrica, tanque)
- Sistema neumático (governor, bleed air, cañerías, filtros, controles)
- Sistema de lubricación (tanque de aceite, cañerías, filtros, sensores, instalación eléctrica)
- Sistema de ignición (bobina, cable, bujía)
- Sensores para instrumentos (TOT (temperatura entre turbinas), N1, N2, presión de aceite, presión de combustible, temperatura de aceite, torque)

También se utilizó información gráfica brindada por la British Columbia Institute of Technology (BCIT) mediante una web donde se presenta un CAD con todos los componentes del motor.

Frente a los componentes faltantes detectados se gestionaron diferentes donaciones, se fabricaron algunos y se adaptaron otros para completar todo el sistema. Así mismo, se desarrolló un sistema eléctrico adaptado y un tablero de instrumentos y control. Por otro lado, se requirió fabricar un sistema de abastecimiento de combustible a través de un tanque y líneas hasta el motor con un sistema propio de cebado.

El desarrollo del conjunto didáctico incluyó el desarrollo de un tablero. A este fin se utilizaron instrumentos que equiparon a un helicóptero MBB BO105. Las mediciones que se adoptaron fueron RPM de turbinas N1 (%), N2 (%), TOT (Temperatura de salida de turbina), temperatura y presión de aceite, y voltaje de las baterías.

La operación del motor requirió el desarrollo de un panel sintético de control, que incluyó actuadores de MASTER, IGNICIÓN y STARTER, y control de combustible, a través de una palanca que evoca simbólicamente los controles que se disponen en aeronaves.

La instalación de sensores y su vinculación a los equipos de medición supuso el desarrollo a medida de elementos que permitan el manejo de las señales producidas, incluyendo fichas de conexión, switches y el análisis exhaustivo de los manuales analizando el sistema de cableado (wiring harness). A su vez, se construyó un arnés de cables para el sistema eléctrico con su respectivo ruteo.



Figura – Tablero con parámetros principales, control de combustible y switchs de puesta en marcha

Tanto el sistema de ignición como el sistema de arranque (starter) requirieron de una instalación eléctrica específica que tuvo que diseñarse teniendo en cuenta en el primer caso la alta tensión transmitida y en el segundo caso la elevada corriente que circula por el sistema.



Figura – Prueba de sistema de ignición (izquierda) e instalación de starter, unidad de combustible y cañerías asociadas.

En cuanto a los sistemas de combustible y lubricación se utilizaron cañerías (también donadas) del helicóptero MBB BO105 en las que hubo que realizar diferentes tipos de adaptaciones

En el caso del sistema de combustible se fabricó un tanque con un bidón de chapa al cual se le adaptó un sistema de medición de cantidad mediante vasos comunicantes y un sistema de válvula de cierre. A su vez en la línea hasta el motor se instaló un sistema flexible (pera) de cebado para el pre encendido.

En lo que respecta al sistema de aceite el tanque se montó sobre la estructura y las mangueras se fueron disponiendo de acuerdo a los largos y a los conectores disponibles.



Figura – Motor en banco. Tanque y cañerías de aceite (gris) y tanque de combustible (verde)

Puesta en marcha y ensayos

Una vez terminada la instalación y verificación de todos los sistemas se procedió a construir los procedimientos de puesta en marcha para garantizar condiciones estándar de seguridad en la operación. Tomando como referencia los manuales de entrenamiento del helicóptero mencionado, se pudo determinar los parámetros a chequear en el pre-arranque, la secuencia de encendido y los valores de los parámetros fundamentales a tener en cuenta.
Con los procedimientos en mano se realizó el primer arranque. El mismo fue cancelado por observar pérdidas de combustible en la unidad. Se debió desarmar todo el conjunto y verificar los problemas. Se encontraron sellos rotos y una vez reemplazados se procedió nuevamente a poner en marcha. En el segundo intento la TOT se iba de parámetro máximo por lo que se canceló nuevamente el ensayo. Pudo determinarse un error en la conexión del cableado en el cuál no se tuvo en cuenta una resistencia específica propia del instrumento. Instalada la misma se realizó una puesta en marcha que cumplió todos los objetivos y todos los parámetros de funcionamiento se mantuvieron dentro de los valores especificados por el fabricante.
A lo largo de los días se hicieron decenas de puestas en marcha y se fueron verificando todas las instalaciones de cada uno de los sistemas con el fin de verificar el correcto funcionamiento y que no haya pérdidas o roturas.
Finalmente, el conjunto desarrollado se utilizó en un trabajo práctico de la materia Motores a Reacción de la carrera de Ingeniería Aeroespacial, integrándose al material didáctico disponible, donde los alumnos identificaron componentes, midieron parámetros y analizaron la performance del motor.

Conclusión

Tras más de nueve meses de trabajo continuo se concluye que el objetivo del proyecto se cumplió. Este material didáctico brinda la posibilidad de que la carrera de Ingeniería Aeroespacial de la UNLP disponga de un motor a reacción comercial, de los más usados en la industria aeronáutica, para que los alumnos vivencien la operación de motores a reacción y adquieran conocimientos prácticos específicos. Todas estas tareas de restauración, verificación e instalación de componentes, en conjunto con la construcción de un banco de prueba, fue motivado con la convicción de que la formación de los alumnos requiere de laboratorios de ensayos prácticos.

Bibliografía

[1] Rolls Royce Allison 250-C20B Ilustrated Parts Catalog (IPC)
[2] Rolls Royce Allison 250-C20B Maintenance Manual (MM)
[3] MBB BO105 Training Manual
[4] https://ltc.bcit.ca/multimedia/_LTC/UnityModelViewer/RR250/

ANÁLISIS ESTÁTICO ESTRUCTURAL DE SEMIRREMOLQUES

Brandom Valencia (1), Facundo Pasquevich (1).

(1) Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.

brandom.valencia@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Los semirremolques son vehículos no motorizados diseñados para transportar grandes y pesadas cargas que carecen de propulsión propia, razón por la cual son completamente dependientes del camión tractor para su desplazamiento. Existen distintas configuraciones de semirremolques cuya distinción más relevante entre ellos es la posición de los ejes traseros, influyendo de forma directa en la distribución del peso total sobre la cantidad de ejes y ruedas totales.

A diferencia del remolque el cual tiene la capacidad de soportar su propio peso, el semirremolque además de soportar la carga sobre sus respectivos ejes, utiliza el plato de enganche perteneciente al camión tractor para apoyar gran parte de su peso total.

En el presente informe se realiza un análisis estructural estático de dos semirremolques cuya configuración difiere únicamente en la posición de sus ejes. Ambos responden a la categoría de 3 ejes, pero uno presenta sus ejes ubicados en la parte trasera del chasis y el segundo, una configuración denominada 2+1 ejes, donde uno de sus ejes se posiciona más cerca de la parte centrar del chasis.

A continuación, se presenta la configuración base de los semirremolques en cuestión junto con sus materiales y propiedades mecánicas.

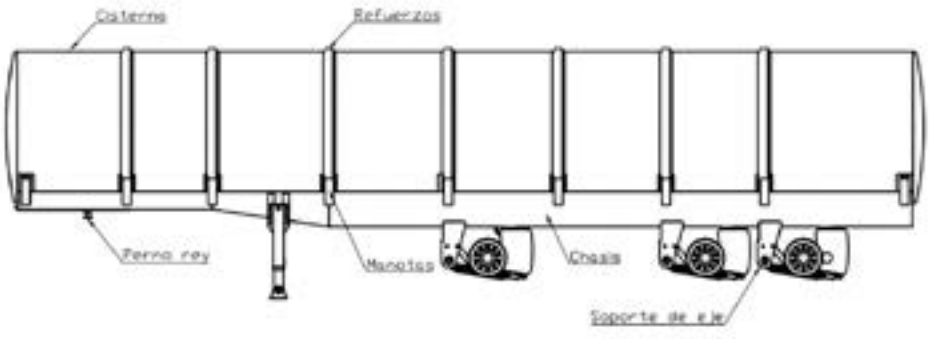


Figura 1: Configuración general de los semirremolques

Tabla 1. Materiales para el modelo simplificado

Componente	Material
Cisterna	Acero inoxidable
Aros de refuerzo	
Manotas	
Chasis completo	
Soporte lateral para eje	
Perno rey	Acero forjado y templado

Tabla 2. Propiedades Mecánicas de materiales utilizados

Propiedad / Material	Acero inoxidable	Acero forjado y templado
Módulo de elasticidad (E) [GPa]	200	193
Tensión de fluencia (F_{yt}) [MPa]	180	205

En la Tabla 3 se detallan las especificaciones de cada semirremolque a tomar en cuenta para la ejecución de este análisis estructural. Sobre la Figura 2 y Figura 3 se presentan los modelos simplificados usados donde se distingue la posición de los ejes entre cada categoría de semirremolque.

Tabla 3. Masas características de los semirremolques

Característica / Semirremolque	3 ejes	2+1 ejes
TARA (sin tractor)	7500 kg	7500 kg
Carga máxima	35000 kg	37000 kg



Figura 2: Modelo simplificado del semirremolque de 3 ejes



Figura 3: Modelo simplificado del semirremolque de 2+1 ejes

El estado de carga total que se evalúa para cada semirremolque corresponde a:

- Peso propio de la estructura del semirremolque (TARA).
- Carga máxima.
- Aceleración de 8m/s^2 (evaluando la condición más desfavorable).

Las condiciones de borde se colocan en los soportes de ejes y en la parte delantera sobre el perno rey. Dichas condiciones se plantean de distintas formas con el fin de comparar las tensiones generadas sobre la estructura de cada semirremolque, además de verificar el uso del plato de enganche como condición esencial para la distribución de tensiones.

Parte experimental

Con el fin de evaluar la importancia del plato de enganche sobre las estructuras, el primer análisis compara las tensiones resultantes únicamente sobre el semirremolque de 3 ejes entre el modelo 1 y el modelo 2, cuyas diferencias se detallan a continuación.

Modelo 1: Los vínculos colocados sobre los soportes de ejes son totalmente rígidos e impiden los desplazamientos laterales y verticales de la estructura. Además, en la parte delantera del chasis se coloca un vínculo rígido sobre el perno rey que restringe los desplazamientos y rotaciones.

Modelo 2: La vinculación sobre los soportes de eje no se modifica con respecto al modelo 1, pero en la parte delantera del chasis se añade el plato de enganche montado sobre el perno rey como elemento rígido. Esta condición de borde se agrega ya que una gran parte delantera del chasis se apoya sobre la cara superior de este plato cuando se monta sobre el camión tractor. Además, la vinculación delantera se coloca sobre este componente, la cual impide cualquier desplazamiento o giro de este componente y presenta interacciones con el perno rey y con el chasis del semirremolque.

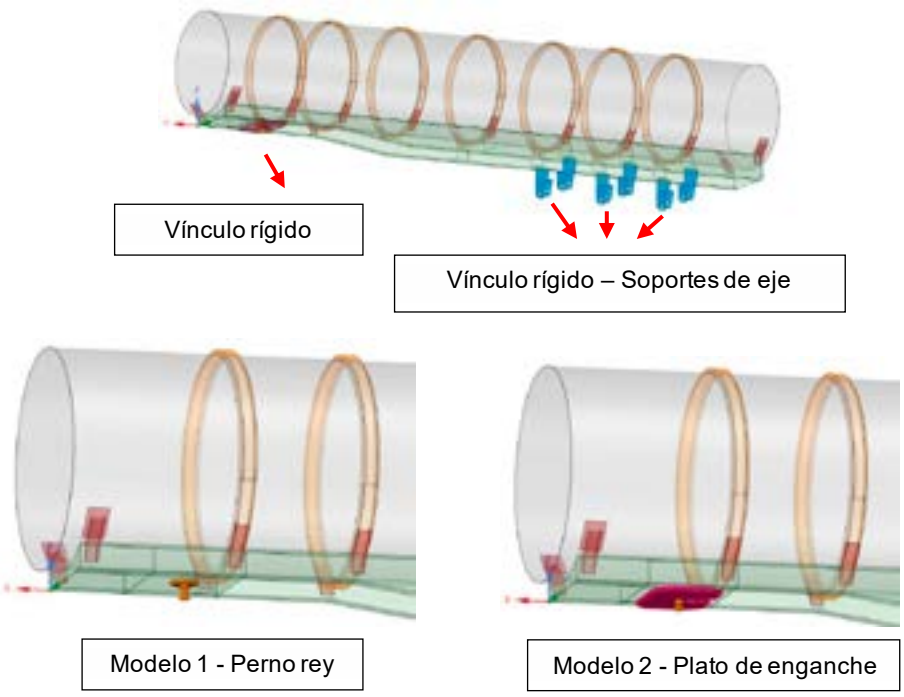


Figura 4: Modelo 1 (a. Sin plato de enganche) y Modelo 2 (b. Con plato de enganche)

El segundo análisis tiene como objetivo comparar las tensiones resultantes sobre las dos categorías de semirremolques (3 y 2+1 ejes).

Modelo 3 y 4: Sobre los soportes de ejes se presentan vinculaciones rígidas que impiden los desplazamientos laterales y verticales y, además, ambas estructuras mantienen el plato de enganche como condición de apoyo de la parte frontal del chasis.

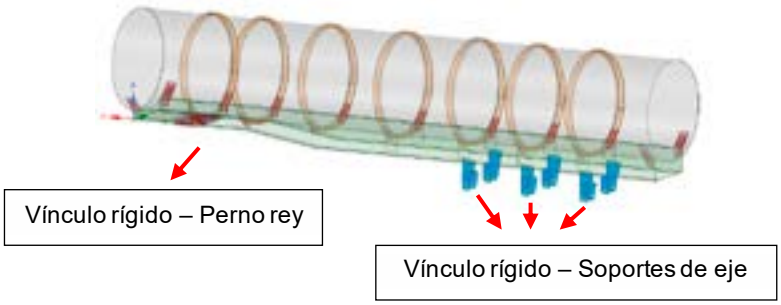


Figura 5: Modelo 3 y Modelo 4 – Vinculaciones rígidas externas con plato de enganche

En el último análisis, se plantea un **Modelo 5 y 6** para obtener las tensiones resultantes de los semirremolques al reemplazar todas las restricciones rígidas que impiden el desplazamiento vertical por vínculos elásticos cuya rigidez se aproxima analizando el total de ruedas que se disponen en cada eje. Además, se mantiene el plato de enganche en la parte delantera.

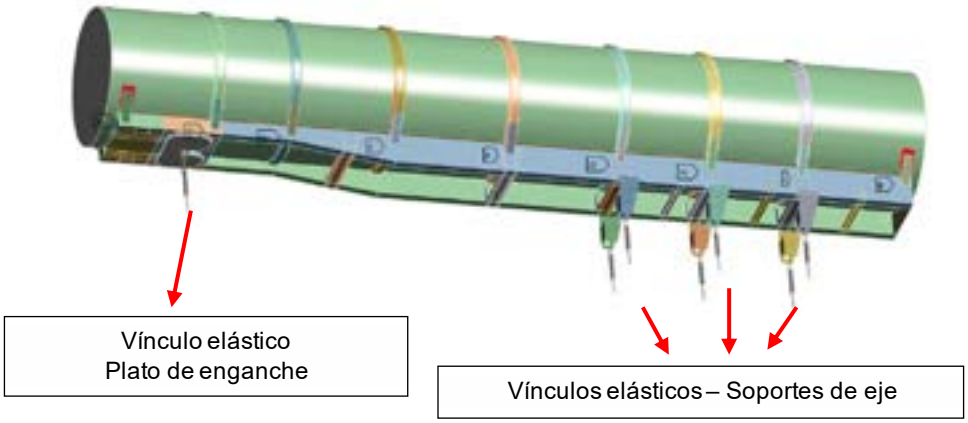


Figura 6: Modelo 5 y Modelo 6 – Vinculaciones elásticas externas con plato de enganche

La rigidez de los vínculos elásticos sobre los ejes del camión se aproxima mediante el esquema (a) de la Figura 7. Mientras que los valores de las constantes elásticas tanto del sistema de suspensión por ballesta y de las cubiertas del semirremolque se aproximan mediante el esquema (b) y (c) de la Figura 7 respectivamente.

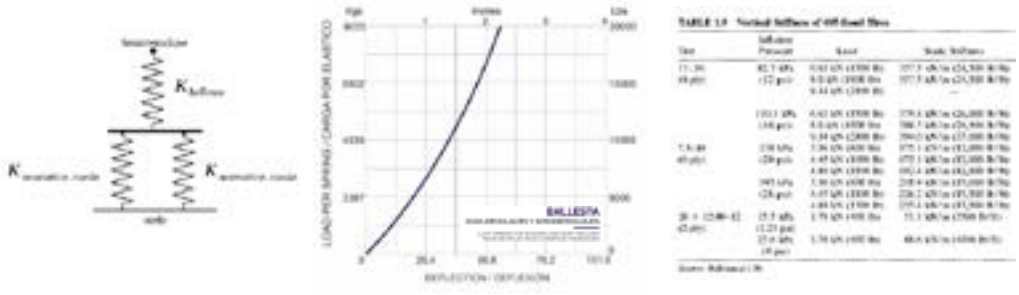


Figura 7: Esquema equivalente para rigidez de vínculo (a). Carga – deformación para ballesta (b). Rigidez estática de cubiertas (c)

Con los datos obtenidos, las constantes elásticas de los componentes se establecen en 1580 N/mm para la ballesta, 390 N/mm para las cubiertas y la rigidez equivalente del esquema resulta de 522 N/mm.

Resultados y discusión

Sobre la Figura 8 se muestran las tensiones totales (limitadas a 110 MPa) sobre la parte delantera del chasis del semirremolque de 3 ejes sin tener en cuenta el plato de enganche y, sobre la Figura 9, el chasis añadiendo este componente logrando un incremento en el área de apoyo.

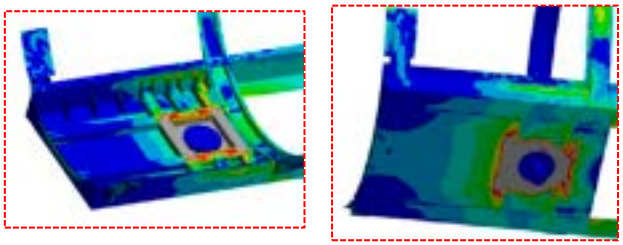


Figura 8: Semirremolque de 3 ejes sin plato de enganche - Tensiones de Von Mises

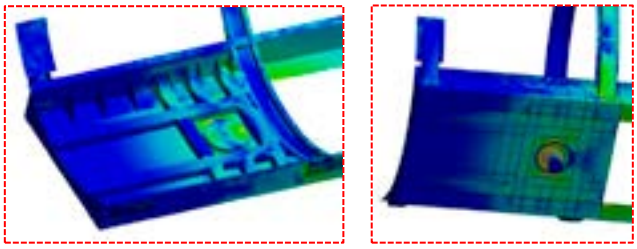


Figura 9: Semirremolque de 3 ejes con plato de enganche - Tensiones de Von Mises

Por otro lado, en la Tabla 4 y Tabla 5 se indica, en porcentaje respecto al peso total del semirremolque correspondiente, el valor de carga que soporta cada vínculo colocado en el modelo. La vinculación 1 corresponde a la reacción vertical en el plato de enganche mientras que la vinculación 2, 3 y 4 se corresponden al par de soportes de eje ubicados sobre los semirremolques de izquierda a derecha acorde a la Figura 2 o Figura 3 respectivamente.

Tabla 4. Vínculos rígidos – Porcentaje de carga sobre cada eje

Semirremolque 3 ejes – Masa total 42500 kg (416,9 kN)			
Vinculación 1	Vinculación 2	Vinculación 3	Vinculación 4
42.6%	27,7%	10,8%	19,5%

Semirremolque 2+1 ejes – Masa total 44500 kg (436,5 kN)			
Vinculación 1	Vinculación 2	Vinculación 3	Vinculación 4
40.5%	23,1%	15,1%	21,3%

Tabla 5. Vínculos elásticos - Porcentaje de carga sobre cada eje

Semirremolque 3 ejes – Masa total 42500 kg (416,9 kN)			
Vinculación 1	Vinculación 2	Vinculación 3	Vinculación 4
42,5%	19,4%	19,2%	18,9%

Semirremolque 2+1 ejes – Masa total 44500 kg (436,5 kN)			
Vinculación 1	Vinculación 2	Vinculación 3	Vinculación 4
37%	20,1%	20,8%	22,1%

Respecto a los esfuerzos que se generan sobre los vínculos rígidos frente a los elásticos, en la Figura 10 se puede ver una gran distinción de portación de carga para estas dos situaciones. Sobre un mismo gráfico se observa que, en porcentaje al peso del semirremolque respectivo, los vínculos rígidos (grafica azul) presentan una mayor discontinuidad en la distribución de carga entre los vínculos 2, 3 y 4, mientras que la vinculación elástica (gráfica naranja) permite una mejor distribución del estado de carga sobre todos los puntos de apoyo del semirremolque en cuestión.

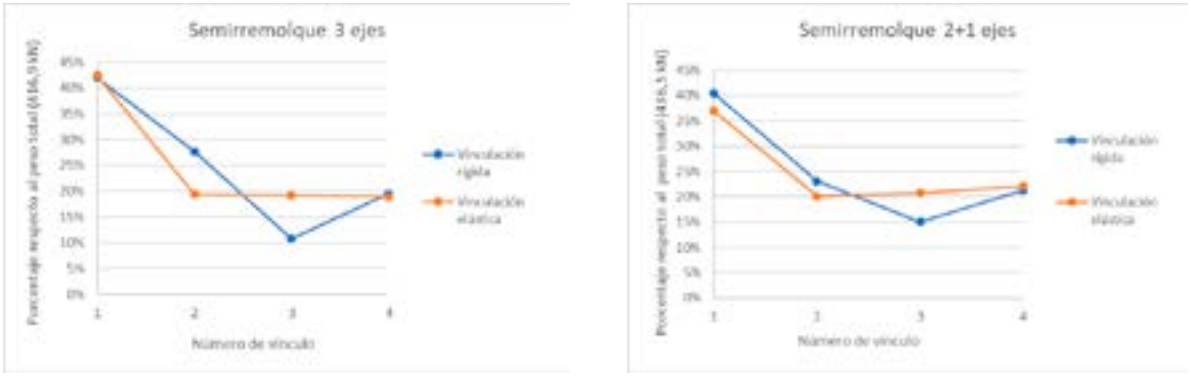


Figura 10: Esfuerzos (en % del peso total) para vinculación rígida y elástica. Semirremolque 3 ejes (a). Semirremolque 2+1 ejes (c).

Conclusiones

El plato de enganche, a pesar de emplearse únicamente como condición de borde sobre la estructura, resulta ser un componente indispensable para la correcta distribución de tensiones sobre el chasis de los semirremolques. Por esta razón se considera a esta pieza como un elemento fundamental para las verificaciones estructurales sobre los semirremolques.

Por otro lado, las vinculaciones rígidas resultan ser útiles para evaluar un estado de carga más conservativo del semirremolque frente a las tensiones reales. Como se observa, en el vínculo rígido número “2”, las tensiones resultan ser más altas que en todos los vínculos traseros (tanto para los rígidos como para los elásticos).

Bibliografía

FAESA, Fábrica Argentina de Elásticos.

Juan E. Monti, Sebastián Rossi, Jorge J. Eliach y Gastón Bourges. *Análisis del comportamiento mecánico estructural de un prototipo de semirremolque sometido a carga estática.* Asociación Argentina de Mecánica Computacional

J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles, Third Edition.*

Xiaolin Chen, Yijun Liu, *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*

EVALUACIÓN BIOMECANICA DE PRÓTESIS DEPORTIVAS

Villar, Juan I., Sánchez Valentina,

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

juanignacio.villar@ing.unlp.edu.ar
valentina.sanchez@alu.ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: Evaluación de prótesis comerciales, Modelo biomecánico, Sesgo de valoración, protocolos de evaluación

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto del “programa Ñandú”, perteneciente a los programas de extensión de la UNLP en el área de Ambiente y salud comunitaria, hemos trabajado para el desarrollo de prótesis deportivas en materiales compuestos para atletas amputados transtibiales unilaterales, orientado a apoyar tanto la iniciación como el alto rendimiento deportivo en atletismo.
Nuestro trabajo abarca desde el diseño y validación de modelos de prótesis, comparándolos con publicaciones existentes, así como la fabricación de piezas prostéticas dedicadas adaptadas a los requerimientos de los usuarios en virtud de las evaluaciones antropométricas y biomecánicas efectuadas.
El precepto de diseño se basa en una análisis de similaridad en desempeño entre la pierna sana la cual es tomada como referencia y la que debe alcanzar la prótesis, midiendo en primera instancia las discrepancias en fuerzas transmitidas al piso (GRF-Ground Reaction Force) y retorno energético entre las prótesis elementales de uso diario no aptas para la práctica deportiva y la pierna sana como modelo a alcanzar.
Las principales características que se pretende lograr de una prótesis tipo ‘Flex- Foot’ son la respuesta elástica lineal, tamaño y proporción apropiada, que deba soportar la carga dinámica y fatiga proporcionada por el corredor transmitiendo al piso igual fuerza y un orden de magnitud de energía similiar a la pierna sana.
La respuesta proporcional responde a un modelo de “resorte lineal simplificado” y la progresión tibial activa, que lanza la hacia adelante el atleta durante la carrera y que es otra característica que debe presentar la prótesis, siendo 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 en la que se almacena 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 de forma equivalente al conjunto de cadena cinemática motriz análoga a la pierna /tobillo de un pierna sana favoreciendo el avance de la tibia (progresión tibial activa) rotando alrededor del punto de apoyo.
La longitud de ‘quilla’ de carbono completa indeformada debe coincidir con la longitud del pie sano en condición de elongación máxima durante la 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.

Dicho proceso conlleva múltiples iteraciones, con pruebas por parte del usuario, y realimentación sobre las discrepancias entre la repuesta esperada, la necesaria y la lograda.
El desarrollo de la prótesis deportiva busca brindar a los candidatos de un elemento prostético

dedicado, capaz transferir la misma fuerza reactiva al suelo (GRF) en cada toma de contacto así como una energía acumulada en deformación elástica en la prótesis que emule el orden de magnitud relevado en la pierna sana así como una potencia equivalente.
Sin embargo los resultados demostraron ser una cota inferior a la necesaria, hecho que redundó en una pieza menos rígida donde las propiedades mecánicas buscadas presentaban órdenes de magnitud acordes pero insuficientes para alcanzar la performance deseada.
Mientras evaluábamos la forma de obtener mejores resultados en el desempeño de los materiales y las piezas logradas mediante la combinación de materiales y mejorando los procesos de fabricación, surgió la necesidad de reevaluar a los atletas, durante la cual se evidenció que los protocolos de evaluación no reflejaban de modo consistente los parámetros buscados para la pieza a desarrollar.

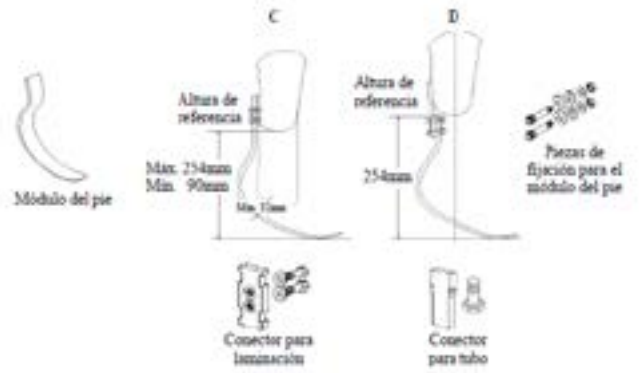


Figura 1: partes de una prótesis Flex-Foot*Cheetah*®

El presente trabajo busca mostrar como el protocolo adoptado para la medición de los parámetros fundamentales involucrados en el diseño de las prótesis, redunda en que los valores medidos previamente introdujeron un sesgo a las valuaciones afectando los parámetros que definen los requerimientos de la prótesis, y que repercute en las propiedades finales de la pieza a desarrollar.
Así pensamos alternativas al protocolo establecido que nos permita salvar las inconsistencias guiar el diseño hacia las características mecánicas requeridas para optimizar el desempeño de las prótesis deportivas en búsqueda de aquellas que debe presentar nuestra prótesis a fabricar.

2. METODOLOGÍA

2.1. Evaluación biomecánica

La evaluación de los candidatos consiste en un protocolo de una batería de saltos sobre 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, velocidades, potencia 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 dicha se la considera una estimación inicial. Obtenidos los resultados del laboratorio de biomecánica, se procede a efectuar un análisis de las fuerzas involucradas en cada salto. Se debe mencionar que existen dos componenetes de fuerzas principales: la fuerza vertical (denominada Fz) y la de avance (denominada Fy), 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: Detalle de evaluación en plataforma de fuerzas

Quedando determinada la fuerza F_z máxima como el pico alcanzado. 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 diferencia de evaluaciones previas esta vez el candidato fue evaluado con una prótesis deportiva comercial para verificar la hipótesis de similaridad establecida. Comparando primero los tipos de salto buscado aquellos que dieran mayor valor pico.

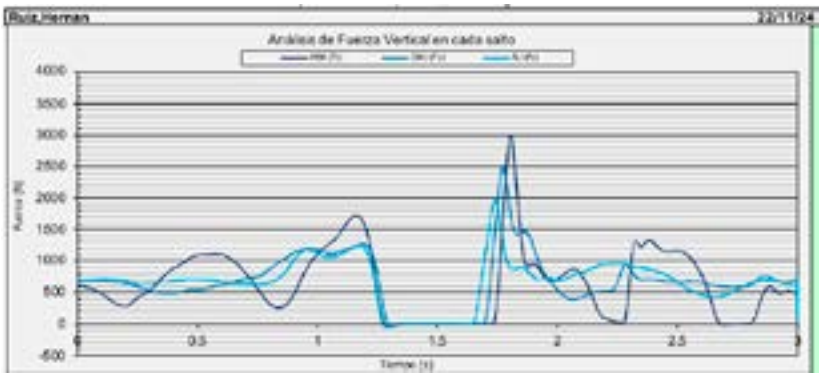


Figura 3: Comparación de valores en batería de saltos que permiten considerar al salto Abalakov y contramovimiento como los de mayor valor pico



Figura 4: Comparación en salto Abalakov para ambas piernas en las 3 direcciones

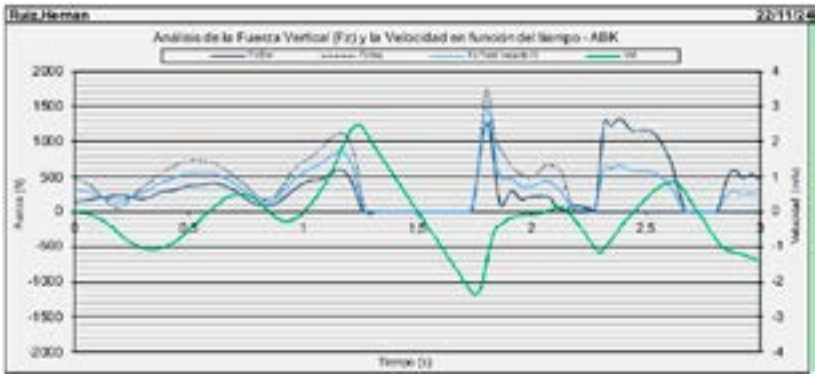


Figura 5: Comparación fuerzas verticales en salto Abalakov ambas piernas y velocidad

FASE PRE-VUELO													
Salto	Impulso Mécanico (N)	Impulso Mécanico / Body Weight	Fuerza Máxima (N)	Fza Max / Body Weight	Potencia Media Impulsiva (N)	Pot. Media Imp./ Body Weight	Potencia Máxima (W)	Pot Pico / Body Weight	Velocidad Media Impulsiva (m/s)	Velocidad Máxima (m/s)	Altura (m)	Indice Coord.y Elastic.	
ABK	314,8	0,44	1721,3	2,51	387,8	0,57	3397,3	4,95	0,73	2,49	0,267	0,29	-
CMJ	210,6	0,31	1356,3	1,87	283,5	0,42	2597,0	3,82	0,73	2,32	0,208		0,13
SJ	189,5	0,23	1395,1	1,82	216,1	0,31	2368,6	3,45	0,51	2,15	0,184	-	

Tabla 1: Valores globales medidos para cada salto en impulso, fuerza, potencia y velocidad

FASE PRE-VUELO														
Salto	Pierna	Impulso Mecánico (N)	Impulso Mecánico Fase Excentrica (N)	Impulso Mecánico Fase Concent. (N)	Deficit Lateral Impulso Mecánico (%) DER	IZQ	Impulso Mécanico (N)	Tiempo Impulso Mécanico (s)	Impulso Mecánico Fase Excentrica (N)	Tiempo Impulso Mecánico Fase Excentrica (s)	Impulso Mecánico Fase Concent. (N)	Tiempo Impulso Mecánico Fase Concent. (s)	Fx Pico (N)	Fy Pico (N)
ABK	DER	270,9	107,7	163,2	89,29	---	305,5	0,697	95,3	0,325	210,2	0,372	-94,8	30,6
	IZQ	512,8	210,6	302,1									108,3	158,8
CMJ	DER	253,0	83,8	169,0	81,30	---	215,0	0,730	53,0	0,258	162,0	0,471	-72,5	47,1
	IZQ	458,7	144,7	313,5									71,8	20,2
SJ	DER	300,7	67,5	233,2	26,91	---	164,3	0,755	9,3	0,191	155,0	0,564	-63,9	79,9
	IZQ	381,6	72,9	308,7									87,5	13,3

Tabla 2: Valores desagregados por cada pierna para cada salto en impulso, fuerzas laterales

2.2. Observaciones sobre los datos relevados

Halladas las fuerzas puestas en juego, definida la respuesta de la prótesis, GRF, energía acumulada y potencia así como fase de vuelo y velocidad, pueden observarse la gran discrepancia existente entre la pierna sana aquella que ofrece los mayores valores pico así como un doble lóbulo en las respuestas producto de la asimetría y compensaciones que aparecen visibles en las curvas de fuerza relevadas en la cual no solo la pierna sana supera ampliamente a la pierna con prótesis deportiva comercial sino que llega en algún tipo de salto hasta doblar su valor pico cuestionando el presupuesto de la similaridad entre ambos miembros.
Esto se observó independientemente del tipo de salto que se analice dado que en todos los casos este desvío o sesgo se vio presente.

		FASE PRE-VUELO					SALTO			FASE POST-VUELO				
Salto	Pierna	Fuerza Máxima (N)	Tiempo Aplicación Fuerza Máxima (s)	Fuerza Máxima (N)	Deficit Lateral Fuerza Máxima (%) DER	IZQ	Indice Coord.y Elastic.	Tiempo Vuelo (s)	Altura (m)	Fuerza Máxima (N)	Tiempo Aplicación Fuerza Máxima (s)	Fuerza Máxima (N)	Deficit Lateral Fuerza Máxima (%) DER	IZQ
ABK	DER	604,7	-0,105	1721,3	84,64	---	0,29	0,467	0,267	1331,7	0,648	3070,8	30,59	---
	IZQ	1116,6	-0,115							1739,1	0,063			
CMJ	DER	499,4	-0,369	1356,3	71,58	---	0,13	0,411	0,208	774,7	0,061	2543,2	128,29	---
	IZQ	856,9	-0,100							1768,5	0,073			
SJ	DER	578,3	-0,325	1395,1	41,25	---		0,387	0,184	395,9	1,119	1990,6	302,81	---
	IZQ	816,8	-0,099							1584,7	0,091			

Tabla 3: Valores desagregados por cada pierna para cada salto en diferentes etapas del movimiento

Sin embargo, cabe destacar que la similaridad en el desempeño (GRF y el orden de magnitud energía) de ambas piernas se establece para una carrera de sprint durante la cual solo una de las piernas las piernas toman contacto con el piso a frecuencias regulares alternadas por fases de vuelo aéreas donde no hay contacto alguno con el suelo.
Muy distinto es el caso de los protocolos de salto en los cuales el atleta apoya ambos pies en sendas plataformas de fuerzas para iniciar sus saltos y luego de la fase aérea casi simultáneamente sobre las mismas.
Por tanto, es normal y aún esperable que el atleta durante la caída se sienta más seguro al confiar su peso sobre mayormente en la pierna sana que sobre la prótesis. Este hecho no se presenta en la carrera de sprint puesto que la toma alternativa de contacto no ofrece otra posibilidad que la de confiarse a la prótesis en una toma individual de contacto con el suelo.
Esta sutil diferencia es la que originalmente pudo haber establecido un valor diferencial de fuerza entre piernas distinto al necesario, que redundó originalmente en una prótesis demasiado flexible que daba al atleta la sensación de hundirse en la carrera.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Alternativa a las pruebas de campo

Buscando recuperar la respuesta de la prótesis sin un sesgo evidente por parte del atleta al confiar en su pie sano ensayamos una nueva batería de saltos dese plataforma son caída a distintas alturas para ver la respuesta de la prótesis y su comparación con los valores establecidos para los protocolos previos, y la linealidad de la respuesta con la altura.



Figura 6: Salto desde plataforma con caída a una pierna altura 30 cm

La comparación entre los saltos del protocolo previo de saltos (ABK, CMJ, SJ) y lo obtenido para el salto desde plataforma muestra que en las fuerzas, tiene no solo un mismo orden de magnitud, sino valores comparables para fuerza exhibida por la prótesis y la pierna sana.

Salto	ΔE (%)	E_acu_der(J)	E_acu_izq(J)2	Fzder_max(N)	Fzizq_max(N)
ABK	87,36	23,45	185,51	1739	1332
CMJ	38,93	54,91	89,90	1768	775
SJ	43,63	42,59	75,56	1594	578
RJ	-24,18	199,14	160,37	1787	1681
30cm	-	199,14	160,37	1787	1681
40cm	-	468,05	82,62	1357	1188

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

3.2. Estimación de la energía

Otro parámetro de importancia es la energía absorbida por la pieza, (E) que se obtiene mediante la integración temporal de la potencia dada por el producto de la velocidad y las fuerzas y que según el teorema de las fuerzas vivas que nos permite estimar, la rigidez de la pieza a fabricar que servirá de parámetro de diseño de la pieza prótesis deportiva, habiendo hallando previamente la deformación mediante un análisis de video.
La E energía elástica almacenada a nivel macroscópico, F_n= Fuerza aplicada, y δ= desplazamiento nos queda:

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

$$\mathrm{K}_n = \frac{F_n}{\delta} \qquad (2)$$

Donde $\mathrm{K}_n$resulta ser la contante 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 como se ha mencionado anteriormente y que debe corresponderse a la energía interna cumulada por el mismo efecto dada por la relación:

$$U = \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}\,.\,\mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon} \approx \frac{1}{2}\mathbf{K_n}\delta^2 \qquad (3)$$

Donde, U representa la energía de deformación elástica acumulada, mientras que $\boldsymbol{\varepsilon}$ resulta ser la deformación elástica macroscópica del material y $U = \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}\,.\,\mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon} \approx \frac{1}{2}\mathbf{K_n}\delta^2$, donde $\mathbf{C}$ es el tensor elasticidad macroscópico resultante para la pieza y con el laminado considerado.

4. CONCLUSIONES

Es válido pensar que para la mecánica de carrera hay un alto grado de similaridad entre el miembro no afectado y la prótesis deportiva. El cambio de paradigma propuesto en el protocolo de evaluación en plataforma de fuerzas nos permite ver como es la respuesta individual y compararla de modo que sea necesariamente similar al de la carrera, es decir, de toma de contacto no simultáneo y alternado entre uno y otro separados por una fase de vuelo, buscando la altura en la que ambos presenten valores no solo cercanos en GRF sino del mismo orden en cuanto a energía de deformación.
Esto puede también ser salvado realizando una prueba en campo que permita realizar una carrera de sprint hacia una plataforma de fuerzas ubicada en el andarivel donde realiza la

carrera aunque de momento es más complejo y costoso de implementar.
Finalmente el siguiente paso para contrastar con los valores de laboratorio son los de instrumentar al atleta con un traje de captura de movimiento y decelerómetros.
Este acercamiento más integral hacia la biomecánica del atleta, fuera del laboratorio permite analizar mayor cantidad de datos experimentales que van más allá de la GRF y le energía como ser los momentos articulares que por ejemplo permiten establecer esfuerzos en las uniones de cono con el fixing bracket y la prótesis así como su vinculación con la progresión tibial de la prótesis.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Grabowski, McGowan, McDermott, Beale, 2009'Running- specific prostheses limit ground-force during sprinting'.
[2] Weyand, Bundle, McGowan, Grabowski, 2009. 'The fastest runner on artificial legs: different limbs, similar function?'.
[3] Dyer BT1'An Investigation Into the Measurement and Prediction of Mechanical Stiffness of Lower Limb Prostheses Used for Running', Sewell P, Noroozi S, 2014.
[4] 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-SpecificProstheses'.
[5]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.
[6] Dyer B1'Sprinting with an amputation: Some race-based lower-limb step observations', Noroozi S2, Sewell P2, 2015.
[7] McGowan CP1, Grabowski AM, McDermott WJ, Herr HM, Kram R, 2012.'Leg stiffness of sprinters using running-specific prostheses'.

CARACTERIZACION AERODINÁMICA DE PERFIL S822 IMPRESO EN RESINA

Gamarra, Ariel Nicolas; Tachi, Martin; Delnero, Juan Sebastian
UIDET LaCLyFA (Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental)
Calle 116 e/47 y 48, B1900, La Plata, Buenos Aires.
ariel.gamarra@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Un perfil aerodinámico es un elemento en el cual al desplazarte a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que generan esfuerzos sobre este. Estos perfiles se utilizan en diferentes industrias como la aeronáutica, automotriz, naval, etc. A modo de ejemplo se observa en la Fig. 1 se observa un perfil aerodinámico en el que se destacan sus partes más relevantes.

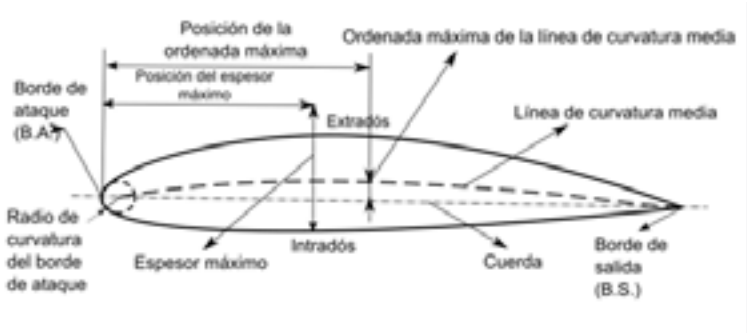


Fig. 1. Perfil aerodinámico de ejemplo

Al pasar el aire por el perfil se genera una distribución de presiones lo que genera un esfuerzo resultante sobre el mismo. Este esfuerzo resultante se puede descomponer en 2 esfuerzos principales, un esfuerzo normal al vector de velocidad incidente llamado sustentación (Lift) y un esfuerzo en el sentido longitudinal a la velocidad incidente resistencia (Drag), el ángulo que se forma entre la velocidad incidente y la línea de cuerda del perfil se denomina ángulo de ataque. Lo mencionado se observa en la Fig. 2, cabe destacar que el objetivo de un perfil es el de generar la mayor carga de sustentación con la mejor carga de resistencia. Los esfuerzos mencionados además de depender de la forma del perfil, depende de las características del flujo incidente (Numero de Reynolds) y del ángulo de ataque.

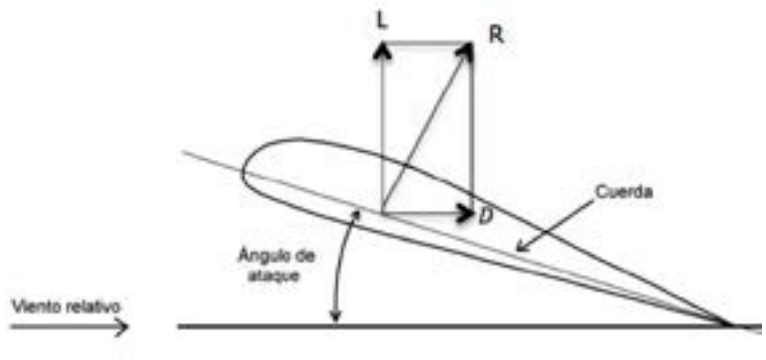


Fig. 2. Esfuerzos sobre el perfil

En este trabajo se busca caracterizar el flujo alrededor de un perfil Selig822, el cual se encuentra diseñado para su uso a bajos números de Reynolds, particularmente en palas de aerogeneradores eólicos.

Parte Experimental

Caracterizar el flujo alrededor de un perfil y los esfuerzos que genere es de interés para los temas de investigación de la UIDET. Una forma de medir el esfuerzo de sustentación y el flujo alrededor es mediante la medición de las presiones generadas sobre la superficie. Para tal fin se utilizan escáneres de presión, los cuales permiten realizar mediciones en múltiples puntos. En particular en este trabajo se utilizan 3 escáneres de presión Scanivalve DSA3217 los cuales permiten en conjunto la medición de 48 puntos en simultaneo.

Para la construcción del perfil se probó un método de fabricación de modelos no usado anteriormente en la UIDET, este es la impresión del modelo en impresora 3D en resina. Este tipo de fabricación nos permite realizar el modelo con los conductos de medición embebidos en este. A diferencia de la impresión 3D típica (PLA, ABS), con esta resulta más seguro realizar conductos internos ya que estos deben ser estancos, cosa que no se logra con la impresión típica. En la Fig. 3 observamos el modelo CAD de la maqueta de ensayo, vemos los conductos internos mencionados anteriormente y las conexiones laterales las cuales sirven de vínculo con los escáneres por medio de mangueras.

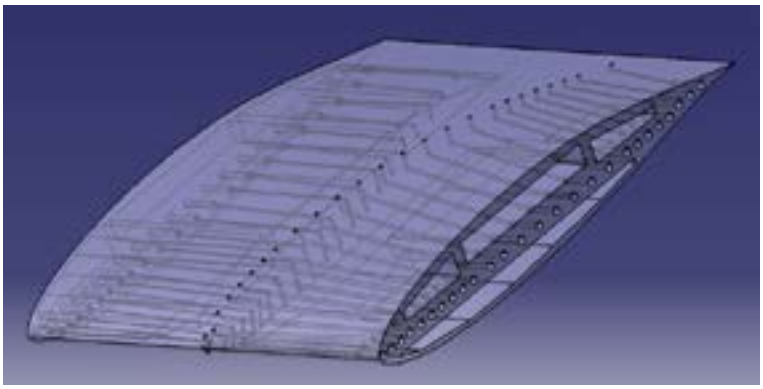


Fig. 3. Modelo CAD (arriba), Modelo impreso (abajo)

Por una cuestión económica, se decide no imprimir todo el modelo en resina, solo una parte central se imprimió en resina y los laterales en PLA. En la Fig. 4 vemos el modelo final a ensayar, se aprecia una zona central impresa en resina y las mangueras que se conectan a los escáneres de presión, el modelo tiene 15 cm de cuerda y 40 cm de envergadura. En la versión final se colocaron 26 tomas de presión en el extradós y 22 en el intradós, distribuidas de tal manera de obtener una buena discretización en los resultados y capturar fenómenos particulares (especialmente en el borde de ataque).



Fig. 4. Modelo para ensayar

La maqueta completa se montó en el túnel de viento 4 (TV4) de la UIDET, el mismo tiene una sección de prueba cuadrada de 40cm de lado. La envergadura del perfil ocupa todo el ancho del túnel, por lo que los efectos tridimensionales se ven minimizados y se puede tomar la hipótesis que el flujo en la zona de medición es 2D y por lo tanto se puede adoptar el estudio como el de un perfil aerodinámico. En la Fig. 5 se observa el montaje en túnel de viento, donde apreciamos la Maqueda por dentro del túnel y las mangueras que salen de estos y se conectan a los escáneres de presión.



Fig. 5. Modelo montado en túnel de viento

Los resultados se obtuvieron para un rango de ángulo de ataque de -6° a 24°, con incrementos de 2°, y para un rango de velocidades entre 5 m/s y 15 m/s, con incrementos de 5 m/s por lo tanto tres valores de Reynolds distintos. Este proceso se repitió en dos ocasiones modificando la posición del elemento de medición de velocidad.

A modo de referencia para el desarrollo del modelo y primeros cálculos se realizaron simulaciones del perfil mediante el método de los paneles 2D mediante el software libre Xfoil[(i)]. Este software nos permite obtener datos del flujo sobre el perfil para diferentes ángulos de ataque, a pesar de basarse en un modelo de cálculo potencial, admite la posibilidad de realizar cálculos viscosos aproximados mediante modelos de capa límite, lo que permite resultados más completos que softwares totalmente potenciales. Este software se utilizó como referencia inicial de las distribuciones de coeficiente de presión y con eso determinar los puntos de medición adecuados.

Resultados y discusión

Se obtuvieron las curvas de coeficiente de presión (C_p) en función de la cuerda, estos coeficientes se grafican y se comparan con los resultados arrojados por el software Xfoil. A modo de ejemplo vemos en la Fig. 6 esta grafica para el perfil para un ángulo de 12° y una Re de 1.53e5. Se observan la comparación entre el software mencionado y el ensayo en túnel de viento, vemos que la cualitativamente ambos resultados son similares y con el ensayo logramos una buena discretización del borde de ataque del perfil, lo que permite ver adecuadamente el gradiente adverso de presiones que se genera en esta área, el cual es en gran parte responsable de la fuerza de sustentación.

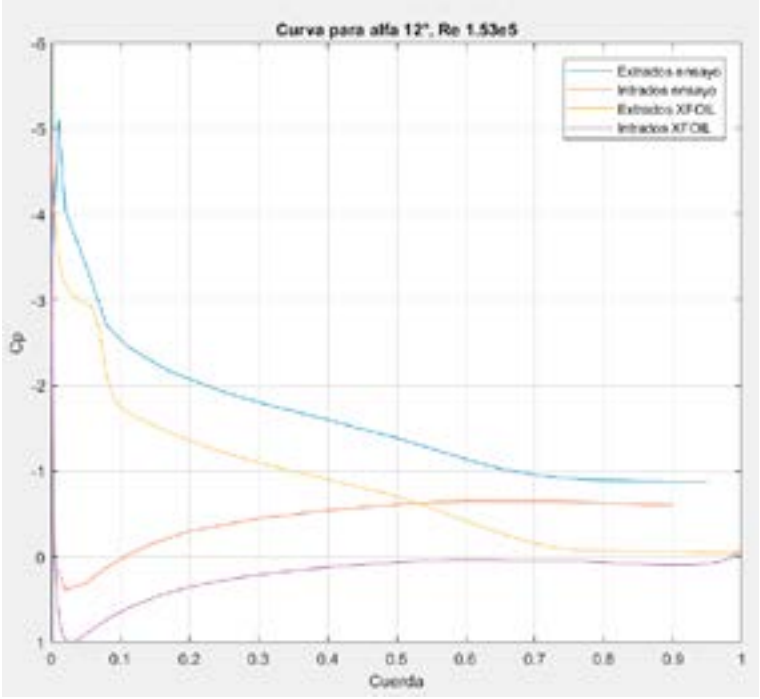


Fig. 6. Resultados de ensayo para $\boldsymbol{\alpha = 12°}$ y $\boldsymbol{Re = 1.53e5}$

En la Fig. 7 vemos los resultados del ensayo para un ángulo de 16°, se aprecia que en esta condición el coeficiente de presiones sobre el extradós del perfil es cuasi constante, lo que nos da entender que el perfil se encuentra en perdida. Analizando los resultados a posteriori vemos que ese ángulo corresponde al punto de máximo coeficiente de sustentación del perfil, por encima de ese valor el perfil empieza a sustentar menos.

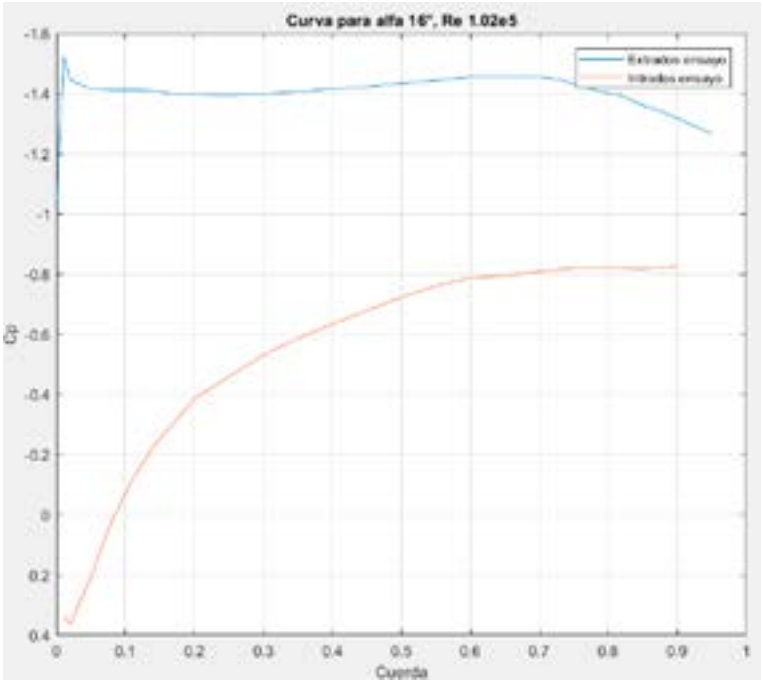


Fig. 7. Resultados de ensayo para para $\boldsymbol{\alpha = 16°}$ y $\boldsymbol{Re = 1.02e5}$

Para presentar los resultados de diferentes ángulos de ataque se puede armar una curva de coeficiente de sustentación C_l versus el ángulo de ataque α. Este coeficiente de sustentación lo obtenemos como el vector normal a la velocidad incidente de la integral del coeficiente de presiones en la cuerda. Se presenta esta curva para un Re = 1.53e5 para el ensayo y el

software Xfoil (Fig. 8), vemos discrepancia en los valores con el software, cabe destacar que los valores del software dan valores extraños, más que nada en la zona donde el perfil debería tener un comportamiento lineal, este comportamiento del software se cree que podría ser debido al valor bajo de Reynolds al cual se está trabajando. En cambio, la curva del perfil ensayado da una curva típica de este tipo de ensayos.

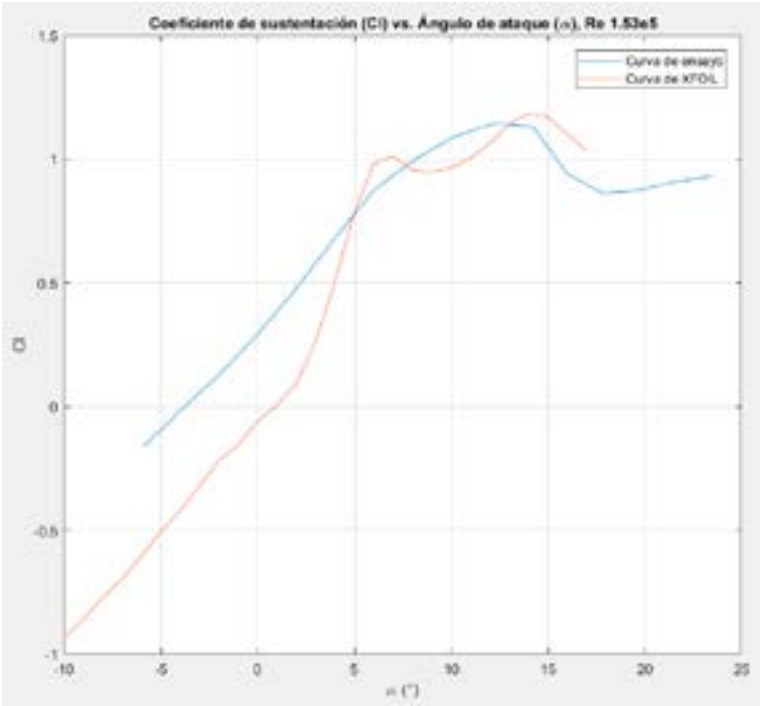


Fig. 8. Curva $C_l \; vs \; \alpha$ par $Re = 1.53e5$

Para terminar esta parte del trabajo se comparan los resultados obtenidos para el coeficiente de sustentación máximo en la Tabla 1, la comparación se hace para los ensayos, el software Xfoil y datos obtenidos de ensayos realizados por Selig[ii], observamos valores similares en el valor de coeficiente de sustentación máximo entre las 3 referencias, aunque notamos una discrepancia en el ángulo al cual se produce.

Tabla 1. Resultados de $C_{l_{max}}$

Velocidad de 10 m/s

Método	Ángulo (°)	$C_{l_{max}}$
Experimental	12.8	1.14
XFOIL	13	1.17
Selig	14.1	1.09

Velocidad de 15 m/s

Método	Ángulo (°)	$C_{l_{max}}$
Experimental	12.2	1.14
XFOIL	14	1.18
Selig	14.2	1.08

Conclusiones

La metodología utilizada en este estudio implicó la impresión 3D del perfil aerodinámico, lo que proporcionó varias ventajas importantes. La impresión 3D permite crear modelos precisos y personalizables con facilidad, lo que facilita la exploración de diferentes configuraciones y

ajustes en menos tiempo y con menores costos. Además, esta técnica permite producir perfiles con geometrías complejas y alta precisión, asegurando consistencia en las dimensiones y características del modelo, gracias a lo cual se realizaron en la pieza central todos los conductos internos asegurando que no haya obstrucciones entre los mismos, y demás detalles como por ejemplo la posibilidad de colocar una toma de presión en el punto de remanso, o también la capacidad para que todos los agujeros sean normales a la superficie en cada punto donde están colocados.

Y con respecto a los ensayos realizados, en base a los resultados obtenidos y analizados, se puede concluir que el comportamiento del perfil aerodinámico estudiado es coherente con las expectativas generales, tanto en el entorno experimental utilizando el perfil impreso en 3D, como en las simulaciones computacionales. La similitud entre las curvas experimentales, las simuladas y las obtenidas en el libro de referencia demuestra que las técnicas de ensayo y análisis utilizadas son adecuadas para el estudio del perfil S802. Sin embargo, las discrepancias identificadas sugieren la necesidad de abordar posibles fuentes de error, como por ejemplo la determinación del ángulo de ataque de referencia.

Es importante mencionar que poder refinar la precisión de las mediciones experimentales y reducir las fuentes de error que afectan la exactitud de los resultados, lo cual, podría incluir el uso de equipos de medición más precisos, así como la implementación de metodologías que permitan una calibración más precisa del ángulo de ataque y otros parámetros críticos, mejoraría los resultados obtenidos en los ensayos.

Bibliografía

[i] Drela, M. (2001). *XFOIL: Subsonic Airfoil Development System* [Software]. Massachusetts Institute of Technology. https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/..

[ii] Selig, M. S., & McGranahan, B. D. (2004). *Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines (2002-2003)*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). https://www.nrel.gov.

CARACTERIZACION DE CONECTORES DE INDUSTRIA NACIONAL PARA USO AEROESPACIAL

Gamarra, Ariel Nicolas; Day, Diego; Rimoldi, Claudio; Figueroa Fernando, Disalvo, Valentín; Raimundi, Serafin; Urangarin, Belen; Manrique, Lautaro.

CTA (Centro Tecnológico Aeroespacial) – Calle 116 e/47 y 48, B1900, La Plata, Buenos Aires.
ariel.gamarra@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Para este trabajo se caracterizaron uniones para tubo marca ABAC, de acero inoxidable, del tipo Virola Contravirola, estas se utilizan para interconectar tramos de tubos con componentes (ej. válvulas, depósitos, actuadores, etc.) o tramos de tubos entre sí, en un sistema de tuberías. Estas uniones son de tipo desmontables y son muy utilizadas en Sistemas de Propulsión. Además, son productos comerciales, de origen nacional. Dicha caracterización viene solicitada por el organismo correspondiente en línea con el desarrollo del lanzador satelital argentino Tronador II.

Para lograr a futuro una especialización (uso apto aeroespacial) de los componentes de esta marca se propone una serie de ensayos de acuerdo con lineamientos de la norma ASTM F1387-99 con exigencias acordes al uso aeroespacial. En una primera tanda de ensayos se propone ensayar el elemento de unión denominado Conector Recto Macho (Fig. 1), el mismo sirve de unión entre los tubos y una conexión NPT macho (Válvulas, Sensores, etc.). Dichos conectores se probaron en 3 medidas (1/4", ½" y ¾") las que presentan mayor uso en los vehículos y bancos de ensayos.



Fig. 1. Conector Recto Macho

Para caracterizar estos componentes se proponen 5 (cinco) de ensayos los cuales son:

- Ensayo Neumático: Cuyo objetivo es verificar la estanqueidad de las muestras a una presión máxima de gas comprimido. Se ensayaron 28 muestras de cada medida.
- Ensayo Hidráulico: Cuyo objetivo es verificar la estanqueidad de las muestras a una presión máxima de líquido. Se ensayaron 28 muestras de cada medida.
- Ensayo de vibracion: Cuyo objetivo es verificar la estanqueidad de las muestras presurizadas con líquido y a la vez sometidas a vibraciones. Se ensayaron 5 muestras de cada medida.
- Ensayo de Torsión: Cuyo objetivo es observar la resistencia de la unión a esfuerzos torsionales. Se ensayaron 5 muestras de cada medida.
- Ensayos Térmicos: Cuyo objetivo es someter la muestra a temperaturas extremas (frio y calor) y observar la estanqueidad durante y post ensayo. Se ensayaron 10 muestras de cada medida a ambos ensayos.

Durante el desarrollo de este trabajo se presentan los resultados de los ensayos de las muestras mencionadas.

Parte Experimental

Armado de las muestras

Este tipo de uniones a ensayar (conector recto macho), están compuestas por una virola frontal, una contravirola, con el cuerpo y la correspondiente tuerca. Cuando la tuerca es ajustada, ambas virolas se mueven axialmente, avanzando dentro del cuerpo (Fig. 2). Este movimiento axial impide cualquier transferencia de torsión al tubo, el cual mantiene de esta forma sus propiedades mecánicas. La contravirola constituye el sello primario de la unión, asegurando fundamentalmente la fijación mecánica del tubo. Durante el proceso de ensamblado, la contravirola se deforma de una manera controlada, con lo cual se obtiene un correcto indentado del tubo, sin reducir excesivamente su diámetro interior. La virola frontal asegura la estanqueidad de la unión y, con su resalto, impide la expansión del cuerpo, permitiendo el desplazamiento libre de la tuerca en los sucesivos rearmados.

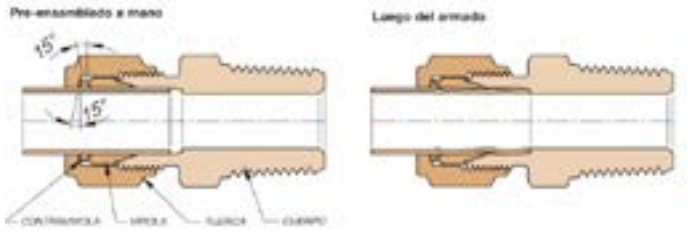


Fig. 2. Detalle de pre y post armado de la muestra.

Estas uniones son de fabricación nacional y tienen trazabilidad ya que llevan grabado el número de lote. Permiten intercambiabilidad con productos similares de otras marcas tales como Gyrolok®, Parker® y Swagelok®.

El armado de las muestras lleva un proceso previo de preparación de tubo, ya que una vez armada la muestra no permite sacar la virola del tubo porque se produce una deformación plástica. Antes de realizar el armado del conector se debe tener el tubo cortado, para ello se utiliza una herramienta preparada para tal caso y se sigue el siguiente procedimiento, luego de cortado el tubo se debe pasar una herramienta rebabadora la cual elimina rebabas generadas propiamente por el corte. Una vez cortado el tubo se procede al armado de los conectores. Si la medida de la conexión es igual o superior a ½" el fabricante recomienda el uso de una herramienta especial de pre-ensamblado.

Ensayos Realizados

Ensayo Neumático

El ensayo neumático tiene como objetivo detectar fugas de gas en las muestras a ensayar. El ensayo se realiza con gas Helio a una presión inicial de 100 bar durante un tiempo determinado y luego a una presión máxima de 400 bar (o el 125% de la presión máxima admisible según el tamaño de la muestra). Para determinar la estanqueidad de la muestra se utilizaba un método visual en el cual se sumerge la muestra en un recipiente con agua y se observaba la presencia o no de burbujas, si no las había la pieza pasa el ensayo exitosamente, si se observan burbujas se admite un reajuste de los componentes, si luego de este reajuste sigue habiendo burbujas la muestra no pasa el ensayo.

Para cumplir con los ensayos se diseña un banco acorde, este consiste en un booster (o amplificador neumático) conectado a diferentes elementos para lograr la presión objetivo. El esquema de esto se puede ver en la Fig. 3

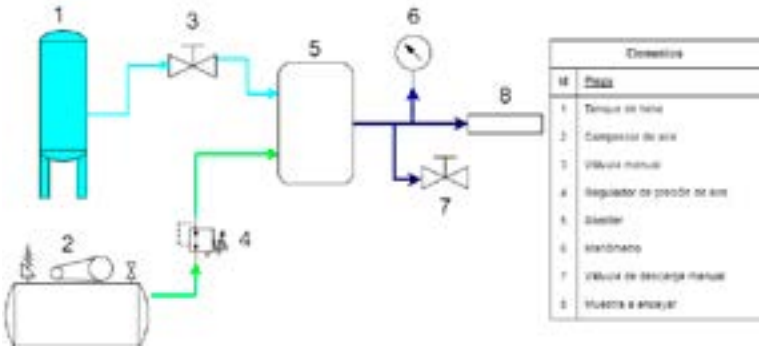


Fig. 3. Banco de ensayo neumático

El booster utilizado es un Maximator DLE 30-GG, este es un equipo de doble etapa con una relación de áreas de 1:30, logrando una presión máxima de 600bar. Para lograrlo necesita una presión mínima para funcionar de gas de 15 bar y una presión de aire de máxima 10bar. Por una cuestión de seguridad el booster con las muestras se montaban en una cámara cerrada de acero, para prevenir posibles estallidos, este tenía una puerta transparente de acrílico lo que permitía visualizar el manómetro y las muestras.

Ensayo Hidráulico

El ensayo hidráulico tiene como objetivo detectar fugas de líquido en las muestras a ensayar. Para realizarlo se propone el siguiente procedimiento. El ensayo se realiza con agua con un procedimiento similar al ensayo neumático. Para determinar la estanqueidad de la muestra se utilizaba un método visual en el cual se observaban fugas de agua en la muestra, si no hay fugas de agua en la pieza, la misma pasa el ensayo exitosamente, de observarse fugas se admite un reajuste de los componentes, si luego de este reajuste sigue habiendo fugas la muestra no pasa el ensayo

Para cumplir con los ensayos se diseñó un banco de ensayos acorde, este consiste básicamente en una bomba presurizadora conectada a diferentes elementos para lograr la presión objetivo. El esquema del banco es similar al del banco neumático solo que utilizando la mencionada bomba para levantar presion. El booster utilizado es un Haskel MS71HP, esta es una bomba de simple etapa con relación de áreas de 1:71, la cual logra una presión máxima de 607bar. Para este caso no fue necesario la utilización de una camara de seguridad ya que al ser muestras chicas al despresurizarse no presentan un estallido como en el caso neumático

Ensayo de Vibracion

El objetivo de los ensayos de vibraciones es observar la capacidad de sellado de las uniones sometidas a vibraciones controladas. Previamente las muestras a ensayar debían tener un ensayo neumático e hidráulico. Luego de los ensayos de vibraciones se sometía nuevamente las piezas a un ensayo hidráulico.

Se construyó una placa para montar los conectores sobre el shaker. Para todas las muestras se realizaron 3 ensayos vibratorios

- Ensayo de vibración exploratoria: para determinar la resonancia de las muestras.
- Ensayo de frecuencia variable: para exponer al conector a un rango de frecuencias.
- Ensayo de durabilidad (frecuencia fija): para determinar los efectos de la exposición a largo plazo del conector a la frecuencia de resonancia determinada.

Las muestras se instrumentaron con acelerómetros en cada eje, en la Fig. 4 se muestra un ejemplo del montaje del ensayo de vibraciones para muestras de ½”. Durante el desarrollo del ensayo las muestras debían estar presurizadas con agua a la presión máxima objetivo del ensayo hidráulico.

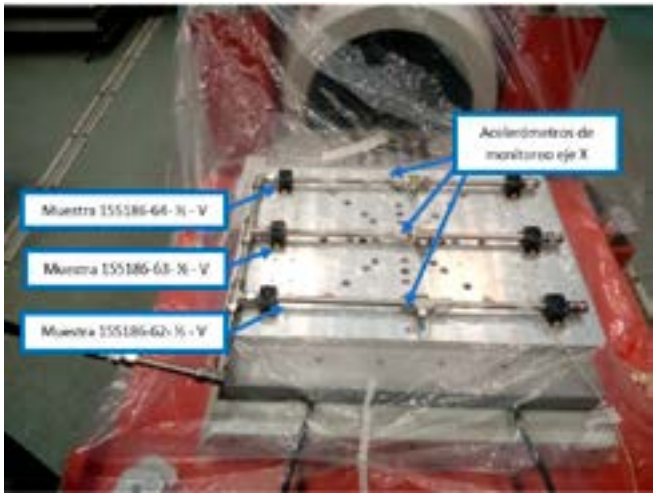


Fig. 4. Muestras de ½" sobre Shaker interconectadas entre si

Ensayo de Torsión

El objetivo de los ensayos fue determinar la capacidad, del acople, de soportar giro relativo entre el conector y el tubo al aplicarse un torque. Previamente las muestras fueron sometidas a un ensayo neumático e hidráulico. Luego del ensayo de torque se volvió a someter a las muestras a un ensayo hidráulico con el fin de determinar existencia de fugas.



Fig. 5. Muestra armada para ensayo de torque

Cada muestra se sujetó del extremo del conector recto macho. La muestra se apoyó sobre un dispositivo que consta de un soporte para evitar deformación por flexión cuando se aplicaba el torque Fig. 6. Se marcaron las líneas de referencia en la muestra, luego se ubica el torquímetro digital en el cuerpo del hexágono de la unión de tubos. Se aplica torque hasta que se obtiene una deformación angular permanente no menor a 1,6 mm (medida sobre las líneas de referencia) o bien un giro relativo no menor a 30°.



Fig. 6. Ensayo de torque

Ensayos Térmicos

El objetivo de los ensayos térmicos es observar la capacidad de sellado de las uniones ante la exigencia simultanea de presión y temperaturas extremas. Estos ensayos se realizaron en 2 etapas, primero ensayos a temperaturas criogénicas y luego a altas temperaturas. Previamente las muestras a ensayar térmicamente debían tener un ensayo neumático e hidráulico. Luego de los ensayos térmicos se someten nuevamente las piezas a un ensayo hidráulico.

Para los ensayos a temperaturas criogénicas se utiliza un banco previamente desarrollado el cual tiene una serie de componentes que permiten la carga de nitrógeno líquido por la zona inferior de la muestra y el venteo por la parte superior. Los ensayos se realizan a una temperatura aproximada de -180°C y a una presión controlada continua de 50 bar.

Para los ensayos a altas temperaturas se colocó las muestras dentro de una cámara térmica que permite elevar la temperatura ambiente a 150°C y se presurizan las muestras a una presión de 50bar. Durante el desarrollo de ambos ensayos se adquieren las temperaturas y presiones.

Resultados

En cuanto a los ensayos de estanqueidad (hidráulicos y neumáticos) se destaca que en solo 1 de las 76 muestras de la medida de ¾" se produjo una fuga durante el ensayo neumático debido a que la unión plástica de la virola con el tubo no soportó, la muestra se reemplazó por otra. Las otras 2 medidas ¼" y ½" pasaron ambos ensayos exitosamente, debiendo hacer reajuste en algunos casos.

Con respecto a los ensayos de torsión, los conectores de ¼" se ajustaron con un torque de entre 5 a 10Nm. Los resultados fueron el giro relativo (en 2 de ellos), y en los 3 restantes deformación angular permanente. Ver [D.A.8]. Ninguna muestra presento fugas en el ensayo hidráulico posterior.

Los conectores de ½" se armaron utilizando un torque de ajuste de entre 30 a 37Nm, y luego se necesitó un torque adicional de re-ajuste, de 70 a 73 Nm. Luego en el ensayo todas las muestras se giraron en la unión de tubo al aplicar un torque entre 36 y 56 Nm. Ninguna muestra presento fugas en el ensayo hidráulico posterior.

Los conectores de 3/4" se armaron utilizando un torque de ajuste de entre 22 a 61Nm, y luego se necesitó un torque adicional de re-ajuste, de 57 a 97 Nm. Luego en el ensayo 1 muestra tuvo giro relativo de 30º en el conector recto macho al aplicar 42Nm, las otras se giraron en la unión de tubo al aplicar un torque entre 52 y 60 Nm.

Con respecto a los ensayos de vibracion, el único inconveniente registrado fue que durante el ensayo de frecuencia variable en el eje Z, se produce una pérdida en 1 muestra de ¾". El evento ocurre luego de 1 hora 52 minutos de haberse iniciado el ensayo. Se detiene el mismo, se procede al reajuste del conector, y luego se reanuda el ensayo. No se registraron nuevas pérdidas hasta la finalización del mismo.

Ninguna muestra presento fugas en el ensayo hidráulico posterior.

Con respecto los ensayos térmicos se presentan a modo de ejemplo dos curvas características obtenidas. En la Fig. 7 vemos una curva temporal de temperatura y presión, las temperaturas se adquirieron en diferentes partes del banco, por lo que se observan diferentes temperaturas, se ve que al llegar a la temperatura objetivo (-180°C) se presuriza la muestra, lo que produce un aumento de la temperatura, y se mantiene presurizada durante un tiempo determinado. En la Fig. 8 vemos una curva característica del ensayo en cámara térmica, en este caso las curvas de temperatura siguen una misma curva lo que se debe a la homogeneidad en las temperaturas de la cámara, al llegar a la temperatura objetivo (150°C) se presuriza la muestra durante un tiempo determinado.

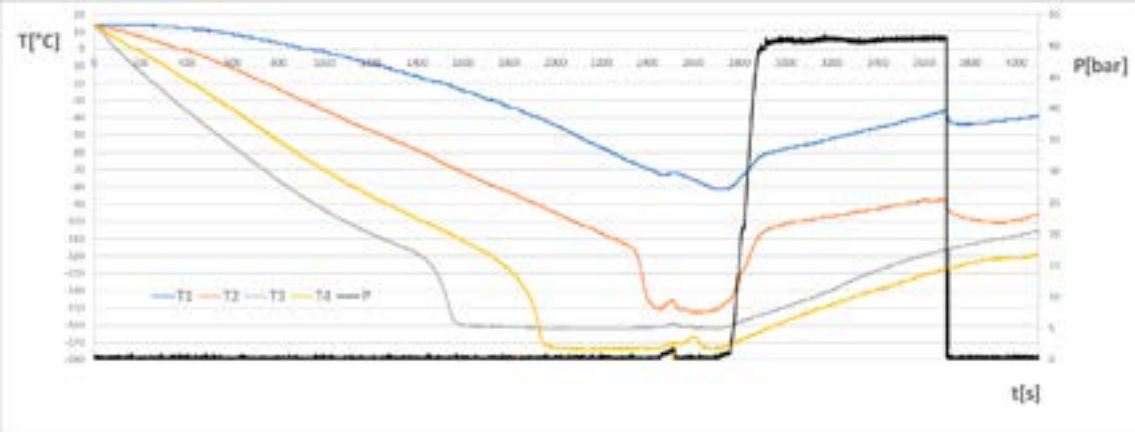


Fig. 7. Resultados ensayo térmico criogénico

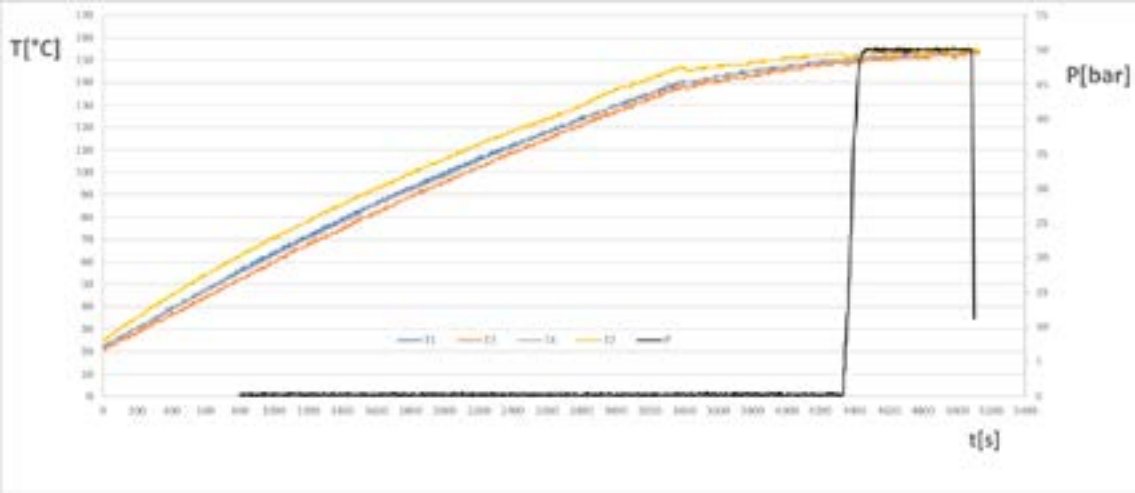


Fig. 8. Resultados ensayo térmico alta temperatura

Conclusiones

Durante el desarrollo de estos ensayos se realizó una curva de aprendizaje tanto de los encargados de los ensayos como de los ejecutores (los cuales son alumnos de la carrera), no solo en la parte técnica del ensayo sino además en procedimientos y medidas de seguridad.

Con respecto a los conectores se observa que los mismos presentan buenas características ante este tipo de exigencia. A excepción de una de las 228 muestras el resto de las mismas pasaron exitosamente todos los ensayos.

Se observa que el procedimiento de armado de estas muestras dado por la empresa fabricante parece ser no adecuado para este tipo de exigencias (hubo que hacer reajustes en varios elementos) por lo que se recomienda trabajar en nuevos procedimientos y/o herramientas para realizar estos trabajos.

Bibliografía

- ASTM International. (1999). *ASTM F1387-99: Standard Specification for Performance of Piping and Tubing Mechanically Attached Fittings*. ASTM International. https://www.astm.org

SISTEMA DE SUJECIÓN Y LIBERACIÓN DE VEHÍCULO LANZADOR

Facundo Pasquevich , Agustin Irigoyen , Juan Crossatto

Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial,
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.
Irigoyenagustin01@alu.ing.unlp.edu.ar
Juan.crossatto@alu.ing.unlp.edu.ar

Introducción

El mecanismo de sujeción y liberación es el encargado de fijar al vehículo lanzador durante la fase previa al lanzamiento, para posteriormente abrirse en un tiempo determinado en el instante del lanzamiento sin interferir en la maniobra de despegue del vehículo lanzador. En el presente trabajo se desarrolla el diseño conceptual de dicho mecanismo, buscando la correcta maniobra de despegue de vehículos lanzadores. El sistema cuenta principalmente con un mecanismo en forma de T (martillo) que pivota alrededor de un eje vinculado a un par de rodamientos. Dicho mecanismo se encuentra en contacto con la base vehículo lanzador y ejerce la fuerza necesaria para retener al mismo en posición despegue gracias a la ayuda de una tuerca pirotécnica en el extremo opuesto del mecanismo.

El presente mecanismo de sujeción debe ser capaz de cumplir con las premisas indicadas a continuación con el fin de lograr una correcta maniobra de apertura.

- El mecanismo debe ser capaz de retraerse por peso propio.
- Debe poseer resortes que aumente la velocidad de la retracción.
- Su liberación debe ser mediante el accionamiento de una tuerca pirotécnica.
- En caso de asincronismo entre mecanismos, este debe ser capaz de no obstaculizar al vehículo lanzador en su ascenso.
- El mecanismo debe retraerse hasta liberar una zona de restricción de 30° respecto a la vertical.

En la Figura 1 se indican los distintos componentes del mecanismo y una aproximación de cómo el mecanismo pivotante retiene al vehículo lanzador mediante el contacto con las salientes de este. A su vez, se indican las cargas actuantes en el sistema.

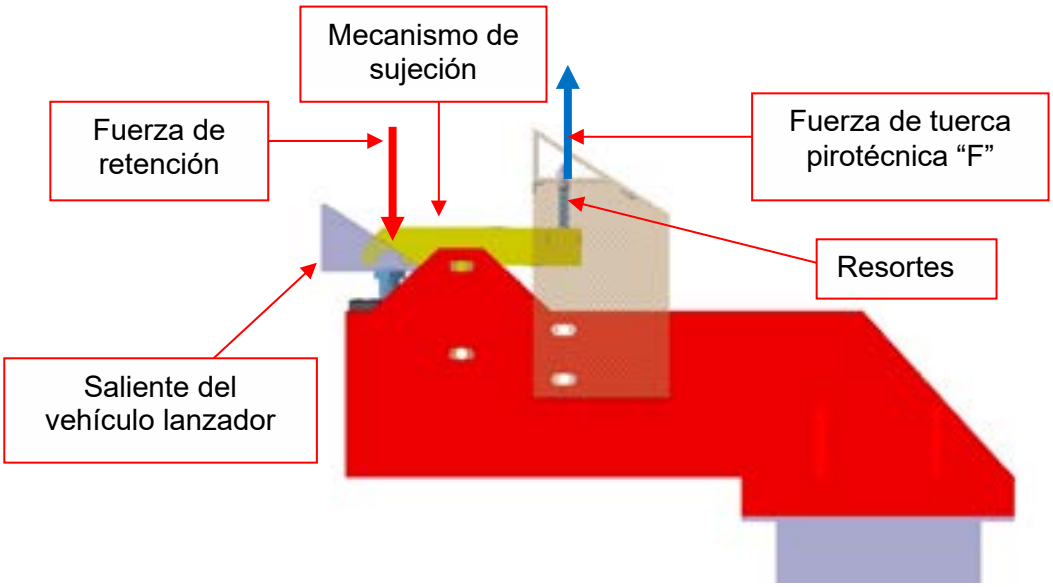


Figura 1: Vista en detalle de la sujeción mediante el mecanismo de martillo.

En la Figura 2 se muestra de forma esquemática la posición en la que el mecanismo de sujeción y liberación se encuentra fuera del cono de restricción, evitando de esta forma con posibles interferencias durante la etapa de despegue.

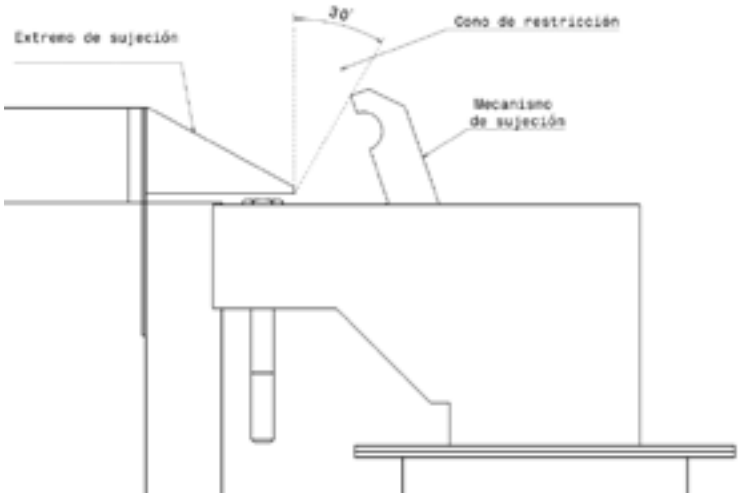


Figura 2: Ángulo en el cual el mecanismo sale del cono de restricción.

El objetivo del presente informe es poder desarrollar y validar un modelo matemático que sea capaz de representar la cinemática del conjunto de sujeción en función de las propiedades del dispositivo que influyen en el tiempo de apertura (masa, momento de inercia respecto al eje de rotación, posición del CG y constantes elásticas del resorte). En la Ecuación 1 se realiza un análisis de la dinámica teniendo en cuenta la contribución propia del mecanismo y a su vez, la del resorte.

Ecuación 1: Segunda ecuación cardinal para el conjunto de sujeción con resortes.

$$\sum \dot{\overline{K_o}} = \sum {M_o}^{EXT} = M_{CG} + M_{RESORTE}$$
$$\rightarrow \frac{d}{dt}(I^o w) = \sum {M_o}^{EXT}$$

$$\rightarrow I^o \dot{w} = m * g * r_{CG} * sen(\theta + \alpha_0) + L * k * (x_0 - x_{(\theta)})$$

Donde:

I^o= Momento de inercia alrededor del eje de rotación.
$\dot{w}$= Aceleración angular del mecanismo.
m= Masa del mecanismo.
g= Aceleración de la gravedad.
r_{CG}= Distancia del CG al eje de rotación.
α_0 = Angulo inicial del CG respecto a la vertical.
L= Punto de aplicación de la fuerza de los resortes (Distancia horizontal respecto a la vertical)
k= Constante elástica de los resortes.
x_0= Compresión inicial de los resortes.
$x_{(\theta)}$= Compresión d los resortes en función de la rotación del mecanismo.

En la Figura 3, se esquematiza la cinemática del conjunto de sujeción para un ángulo de rotación genérico en donde el resorte aún se encuentra en contacto con el mecanismo. El eje x de la figura indica la longitud de expansión del resorte en función de la rotación una vez liberado el mecanismo. La fuerza del resorte F actúa en dirección vertical, paralela al eje local x, es por esto por lo que el brazo de palanca es invariante durante la rotación. Por lo tanto, que el momento ejercido por el resorte depende únicamente de la elongación de éste en función de la distancia $x = f(\theta)$.

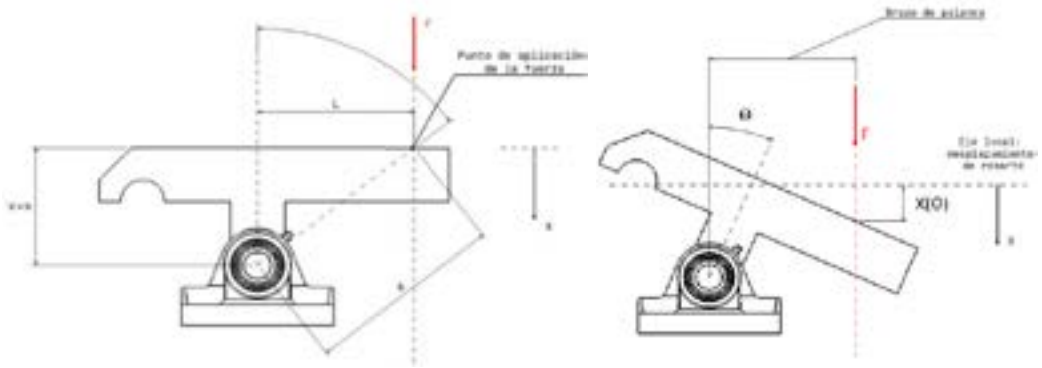


Figura 3: Cinemática del conjunto de sujeción.

Parte experimental

A modo de verificación del modelo matemático, se realiza un análisis FEM del mecanismo de sujeción en donde se analizan dos estados de carga distintos, uno estático, representando al mecanismo en su etapa de sujeción en el cual el mecanismo posee una vinculación isostática, en donde se busca estudiar las reacciones sobre los distintos vínculos cuando los resortes están totalmente comprimidos. El otro estado de cargas corresponde a un estado de cargas dinámico donde se observa cómo evoluciona el mecanismo durante la

maniobra de liberación. En la Figura 4 se muestra el modelado del conjunto de sujeción mediante el análisis FEM.

Figura 4: Modelado del conjunto de sujeción con resortes.

En la Figura 5 se muestra cómo evoluciona el mecanismo durante la maniobra de liberación y en la Figura 8 se comparan los resultados obtenidos entre el modelo FEM y el modelo analítico.

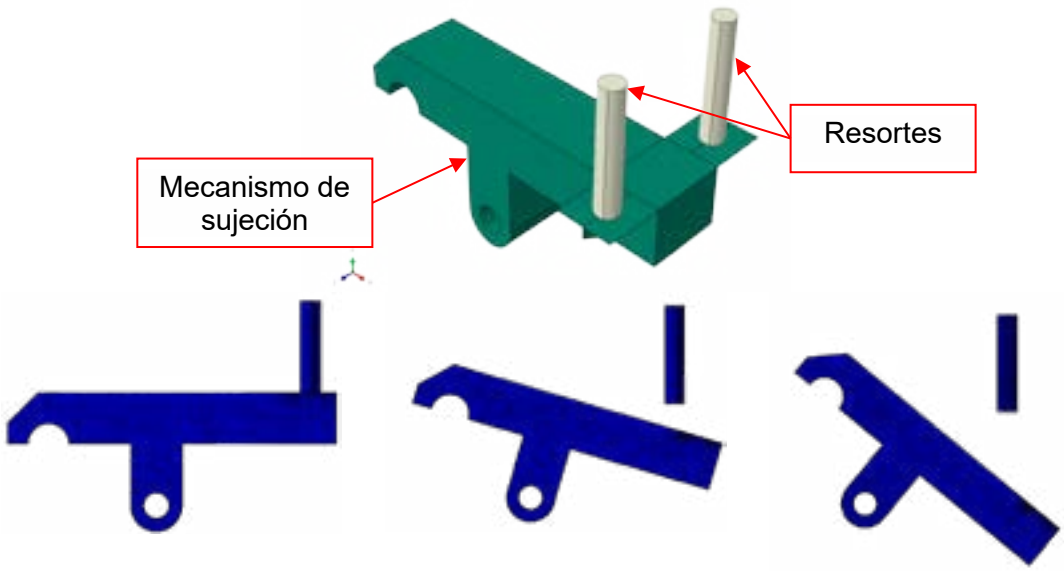


Figura 5: Evolución del mecanismo durante la maniobra de liberación.

Posteriormente se realiza un modelo a escala real con el objeto de simular las condiciones reales del mecanismo durante la etapa de despegue. El objetivo del ensayo es poder determinar y verificar el tiempo de apertura de este y, en el caso de ser necesario, realizar distintos ensayos que garanticen un tiempo de apertura dentro del rango de tiempo establecido, pudiendo de esta forma cuantificar el error cometido en los cálculos analíticos. Para la realización del ensayo, y posterior validación, deben conocerse primero las propiedades del dispositivo que influyen sobre el tiempo de apertura (masa, momento de inercia respecto al eje de rotación, posición del CG respecto a algún eje de referencia y las constantes elásticas de los resortes) para poder tener una retroalimentación al modelo matemático. El ensayo consta en aplicar la compresión necesaria en los resortes para lograr el tiempo de apertura requerido, colocando y asegurando el mecanismo en la posición final de sujeción, tal como se puede apreciar en la Figura 6.

Posteriormente, se corta la cuerda dejando que el mecanismo caiga por la acción de su propio peso y de la precarga de los resortes, la cinemática del movimiento es capturada por una cámara de alta velocidad con una resolución de 4000 cuadros por segundo. Dicho ensayo se repite 3 veces con el fin de evitar posibles resultados anómalos durante la realización del mismo, de igual forma que los ensayos realizados anteriormente.

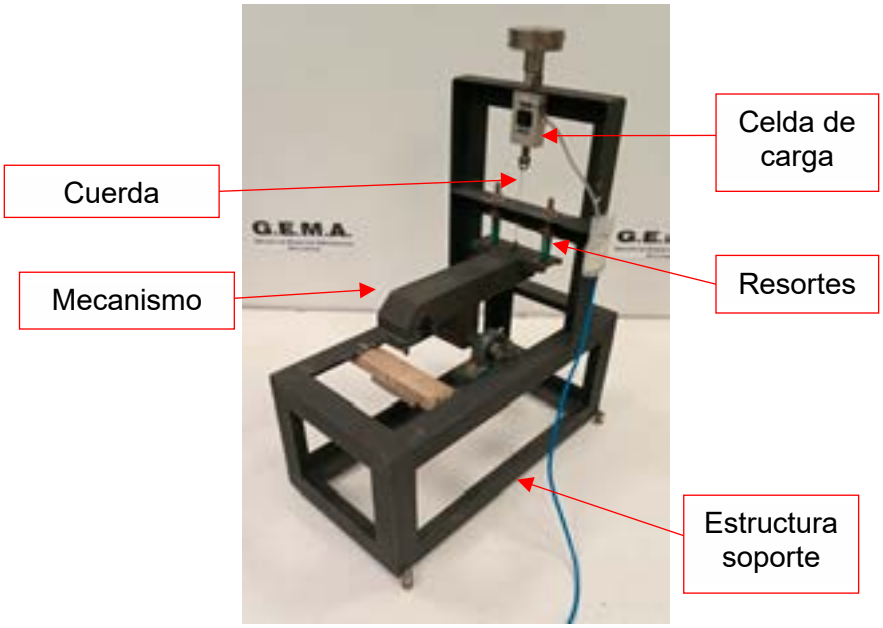


Figura 6: Mecanismo de sujeción sobre la estructura de ensayos.

En la Figura 7 se presenta la secuencia de apertura del mecanismo para una rotación de 90°.



Figura 7: Secuencia de apertura**.**

Para la determinación del tiempo de apertura se cuentan la cantidad de fotogramas desde el instante en el que el mecanismo empieza a descender y el instante en el que coincide con la marca de 90° ubicada sobre la regla graduada. El tiempo de apertura se determina conociendo la cantidad de cuadros hasta determinado ángulo de interés.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos junto con los resultados obtenidos mediante el modelo analítico.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran de forma comparativa los tiempos de apertura obtenidos mediante la simulación FEM y los resultados obtenidos de forma analítica.

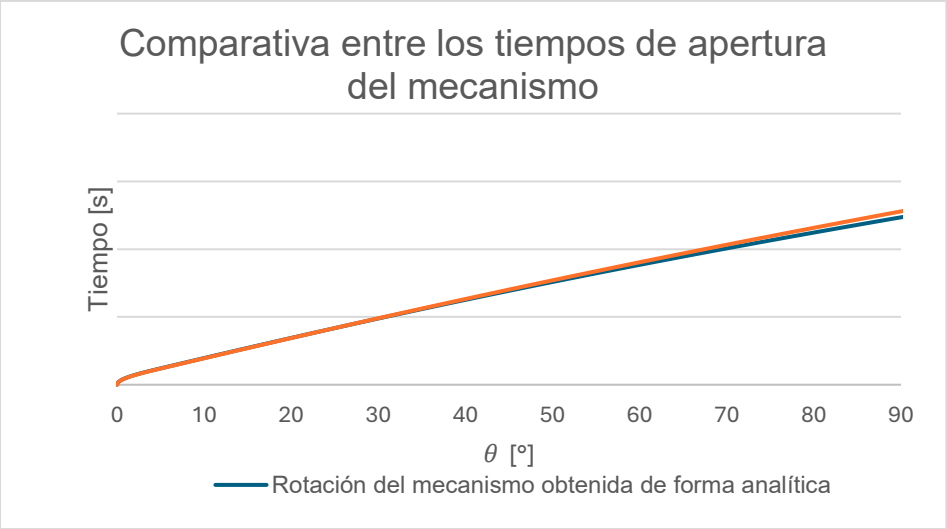


Figura 8: Comparativa entre los tiempos de apertura del mecanismo.

En la Figura 8 se puede apreciar un comportamiento similar en el tiempo de apertura entre el modelo de elementos finitos y los cálculos analíticos, siendo que para una rotación del mecanismo de 90° existe una discrepancia de 3,2% entre ambas curvas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con el modelo a escala real en cuanto al tiempo de apertura se refiere.

Tabla 1. Resultados del ensayo de alta velocidad.

N° de ensayo	Error porcentual (%)
1	4,29
2	3,12
3	3,90

Conclusiones

En base a los resultados mostrados por el modelo a escala real, se tiene que el tiempo de apertura del ensayo difiere en promedio un 3,77 % respecto del cálculo analítico, mientras que el análisis FEM difiere en un 3.2%, dando por válido el modelo matemático que describe el comportamiento del mecanismo de sujeción. Pudiendo utilizarse dicho modelo para determinar el tiempo de apertura en base a los parámetros intervinientes en su cinemática, los cuales se nombraron a lo largo de este documento.

Bibliografía

- F.P. Beer, E. Russell Johnston: Mecánica vectorial para ingenieros - Dinámica. 7ma Edición. Mc Graw-Hill, 2005.
- S. Targ. Curso breve de mecánica teórica. Ed. Mir, 1971.

DISEÑO DEL SERVICIO AÉREO Y SELECCIÓN DE AERONAVE PARA OPERACIÓN EN PISTA ELEVADA EN SAN JUAN

Pesarini Alejandro, Di Bernardi C. Alejandro, Pitrelli Sergio

Grupo de Transporte Aéreo – UIDET "GTA-GIAI", Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 entre 47 y 48 s/n (1900) La Plata, Argentina. ajp@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En el contexto de uno de los proyectos binacionales relacionados directamente con el Tratado de Integración y Complementación Minera entre Argentina y Chile cuyo acuerdo inicial se firmó en el año 1997 y que fue finalmente promulgado en el año 2000, se analiza el servicio de transporte aéreo para un proyecto minero en la provincia de San Juan, localizado entre 3.000 y 4.200 metros de elevación en la cordillera de Los Andes, cerca de la frontera con Chile

El Proyecto consistió en el desarrollo de una mina a cielo abierto para extraer cobre y molibdeno, y procesarlo mediante flotación, con 910 trabajadores en diferentes departamentos: administración, mina, planta de procesos y planta de filtros, teniendo en consideración la distancia existente entre la ciudad de San Juan y la mina, y las características de la topografía, surge la necesidad de implementar alternativas de transporte aéreo que permitan la rotación de los trabajadores.

Con el fin de avanzar con la planificación del sistema de transporte aéreo es necesario sintonizar la performance de las aeronaves seleccionadas con el desarrollo posible de la infraestructura aeroportuaria. Las entradas disponibles son la elevación del emplazamiento del aeródromo y sus condiciones meteorológicas: intensidad y dirección de viento, presión atmosférica y temperatura ambiente, con esto se procedió a:

- evaluar y seleccionar las aeronaves factibles de operación en el emplazamiento de la mina
- seleccionar posibles emplazamientos de pista y evaluar las características geométricas posibles para la pista de cada uno,
- realizar la elección de la(s) aeronave(s) en base a su mejor adaptación con los criterios establecidos, y
- distinguir las aeronaves factibles con base al criterio y estrategias de la demanda – rotación de personal del proyecto minero-, dimensionar la flota necesaria para la operación.

AERONAVES SELECCIONADAS

El análisis preliminar evaluó las limitaciones operativas del emplazamiento y su impacto en la planificación de vuelos y servicios. Los aviones seleccionados fueron:

- Metro 23:
- Cessna Grand Caravan 208B
- Dornier Do228

El comportamiento de la temperatura y presión atmosférica según los registros disponibles del emplazamiento de la mina se muestran en las Figuras 1 y 2.

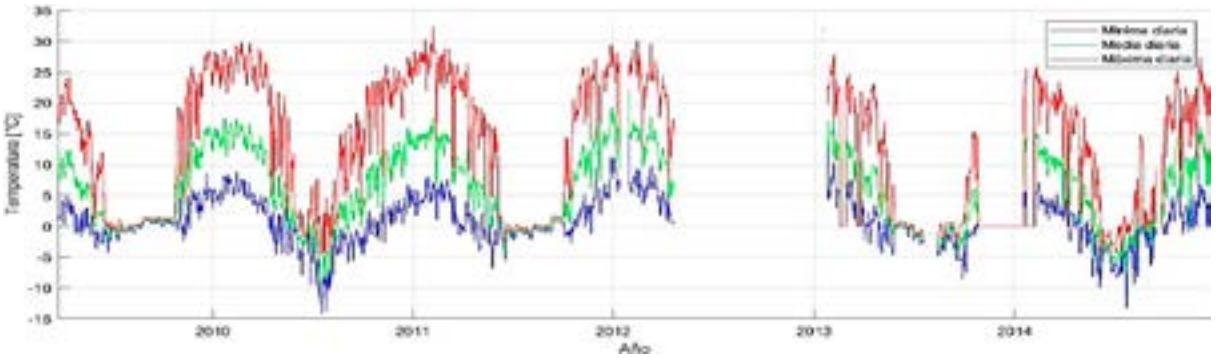


Figura 1 - Comportamiento Temperatura ambiente 2010-2015

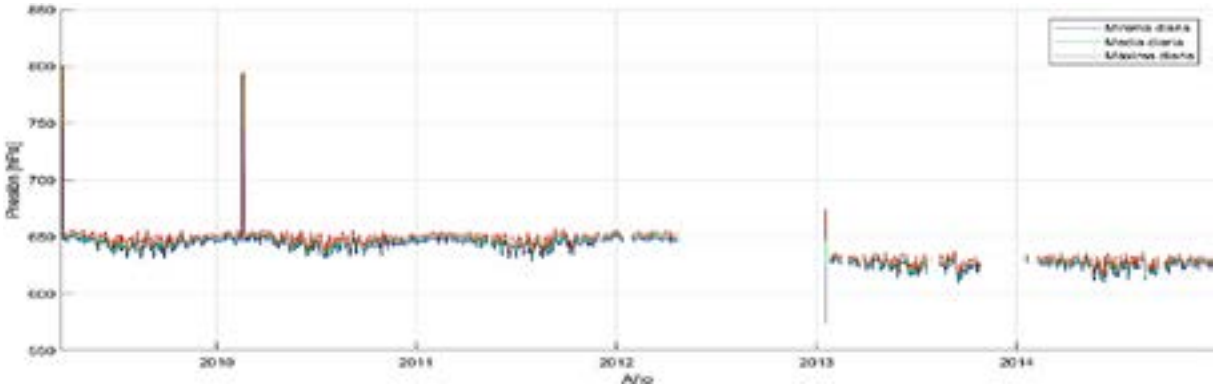


Figura 2 - Comportamiento Presión atmosférica 2010-2015

Los posibles emplazamientos de pista se encuentran con una elevación mínima de 10040 y máxima de 12380 pies, con el comportamiento de la temperatura y la presión que se observa en las Figuras 1 y 2. A los efectos de los cálculos de performance se adoptó un valor de presión atmosférica correspondiente a la elevación de 10000 pies, y para la temperatura valores de 5 y 15 grados centígrados.

En las Tablas 1 y 2 se presenta una comparativa de los modelos de avión analizados y en las Tablas 3 y 4 los resultados de los cálculos de performance según los escenarios previstos.

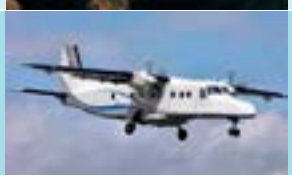
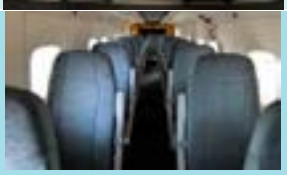
Avión	Vista general de la aeronave	Interior de la aeronave
Fairchild Metro 23		
Cessna 208B		
Dornier Do228		

Tabla 1 - Imágenes de los aviones analizados

Características principales de las aeronaves	Fairchild Metro 23	Cessna 208B Gran Caravan	Dornier Do228
Velocidad máxima	576km/h	300 km/h	370 Km/h
Misión	Transporte ligero	Transporte ligero	Transporte ligero
Fabricante	Fairchild Aircraft, Syber Jet Aircraft	Cessna Textron	Dornier
Altitud máxima de despegue	12000 pies (3660 m)	12000 pies (3660m)	12000 pies (3660m)
Peso operativo vacío (OEW)	4130Kg (9100lb)	2360kg (5200lb)	3000Kg (8157lb)
Carga paga + combustible (PL + FL)	3365kg (7400lb)	1340kg (3000lb)	3200kg (7050lb)
Peso máximo sin combustible (PL + OEW)	6580kg (14.500lb)	No declarado	5050kg (11133lb)
Peso de despegue (MTOW)	7495 kg (16500lb)	3700 kg (8160lb)	6200kg (13669b)
Tipo de propulsión	Biturbo hélice	Turbo hélice	Biturbo hélice
Marca motores	Garret	Pratt&Whitney	Garrett
Modelos motores	TPE-331- series	PT6A-140- series	TPE 331-5 series
Operadores en argentina	Ejército Argentino, A Jet	Ea, Pna, Aviaser Dacc, Dpao	
Certificado tipo	A8SW	A37CE	A16EU
Cantidad de plazas	19 +2	12+2	19 + 2
Presurizado	Si	No	No
Peso máximo de combustible	2470kg (5445lb)	1000kg (2200lb)	1950Kg (4300lb)

Tabla 2 - Características principales de las aeronaves

Las determinaciones realizadas tuvieron por objeto establecer las características físicas de la pista, motivo por el que solo se presentan para los aviones seleccionados las distancias críticas de la operación: aceleración parada (ASD), recorrido para el despegue (TOR) y distancia para el despegue (TOD).

Performance de la aeronave para la operación a 10000 pies de elevación		Fairchild Metro 23	Cessna 208B Gran Caravan	Dornier Do228
Datos de calculo	Temperatura ambiente	5 ºC (ISA+10ºC)	0ºC (ISA+5ºC)	5 ºC (ISA+10ºC)
	Altitud de presión	10000 pies (3048m)	10000 pies (3048m)	10000 pies (3048m)
	Peso Operacional de despegue (OTOW)	6450 kg (14220lb)	3700kg (8300lb)	5500 kg (lb)
	Pendiente pista	0%	0%	0%
	Viento	0 km/h	0 km/h	0 km/h
Datos de salida operación	Distancia aceleración parada (ASD)	6700 pies (2040m)	5700 pies (1725m)	3750 pies (1150m)
	Carrera de despegue (2 motores) (TOR)	No disponible	No aplica	No disponible
	Distancia de despegue (TOD) (2 motores 35 pies)	No disponible	No aplica	No disponible
	Carrera de despegue (TOR´) (1 motor 35 pies)	6300 pies (1920m)	3655 pies (1115m)	3500 pies (1070m)
	Distancia de despegue (TOD´) (1 motor 35 pies)	7000 pies (2130m)	5985 pies (1825m)	4000 pies (1220m)

Tabla 3 - Performances Escenario 1

Performance de la aeronave para la operación a 10000 pies de elevación		Fairchild Metro 23	Cessna 208B Gran Caravan	Dornier Do228
Datos de calculo	Temperatura ambiente	15 ºC (ISA+20ºC)	10ºC (ISA+15ºC)	15 ºC (ISA+20ºC)
	Altitud de presión	10000 pies (3048m)	10000 pies (3048m)	10000 pies (3048m)
	Peso Operacional de despegue (OTOW)	6120 kg (13490lb)	3700kg (8300lb)	5200 kg (lb)
	Pendiente pista	0%	0%	0%
	Viento	0 km/h	0 km/h	0 km/h
Datos de salida operación	Distancia aceleración parada (ASD)	6500 pies (1980m)	6150 pies (1875m)	4500 pies (1370m)
	Carrera de despegue (2 motores) (TOR)	No disponible	No aplica	No disponible
	Distancia de despegue (TOD) (2 motores 35 pies)	No disponible	No aplica	No disponible
	Carrera de despegue (TOR´) (1 motor 35 pies)	6200pies (1890m)	4100 pies (1250m)	4300 pies (1300m)
	Distancia de despegue (TOD´) (1 motor 35 pies)	6700pies (2050m)	7035 pies (2145m)	4800 pies (1470m)

Tabla 4 - Performances Escenario 2

En todos los casos la condición de despegue fue pista seca y aire sangrado apagado, en el caso de Metro 23 se configuró con empuje húmedo, en el caso del avión Cessna Grand Caravan se adoptó para la declaración de distancia de aceleración parada 1,5 veces la carrera de despegue.

ALTERNATIVAS DE EMPLAZAMIENTO DE PISTAS

Se evaluaron 6 posibles emplazamientos para la pista en el entorno al proyecto minero, ubicados según se observa en la Figura 3 y con las características detalladas en la Tabla 5.

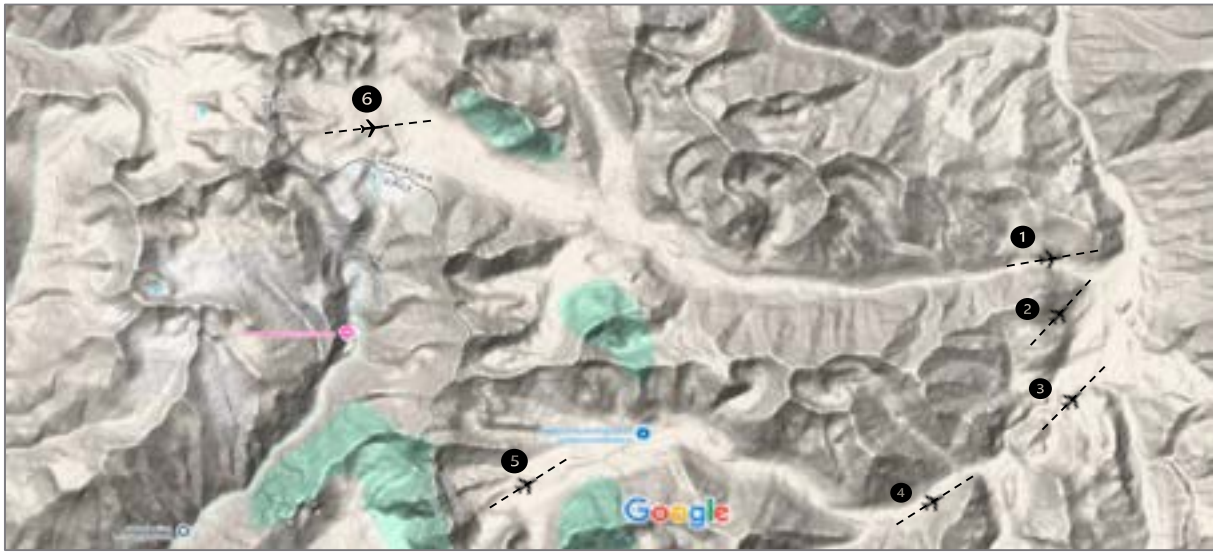


Figura 3 – Emplazamientos posibles para el desarrollo del Aeropuerto

Pista Nº	Longitud (m)	Elevación (pies)	Desmonte (m^3 x 1000)	Relleno (m^3 x 1000)	Movimiento de suelos (m^3 x 1000)	Notas
1	820	10040	360	260	620	Pista muy corta, bajo movimiento de suelos
2	1000	10090	2475	555	3020	Pista muy corta, movimiento de suelos medio
3	1200	10170	1325	1575	2900	Pista corta, movimiento de suelos medio
4	800	10580	206	86	292	Pista muy corta, bajo movimiento de suelos
5	2000	12380	1465	1567	3032	Alta elevación, movimiento de suelos medio
6	1800	12000	12933	6595	19528	Alta elevación, alto movimiento de suelos

Tabla 5 – Principales características de los emplazamientos analizados

MODELOS DE DEMANDA

El personal destinado al proyecto minero asciende a 910 personas distribuidas de la siguiente manera: 160 en el Departamento de Administración, 390 en extracción Mina, 300 en la Planta de Procesos y 60 en la Planta de Filtros.

La totalidad del personal de Departamento de Administración debe estar en el proyecto de lunes a viernes.

El personal de extracción mina y plantas -procesos y filtros- tendrá una rotación del 50% en guardias de 7 o 14 días, y cada guardia se organiza en turnos de trabajo diurnos y nocturnos.

A los efectos de establecer los modelos para la demanda se dividió al personal de la siguiente manera: administración en dos grupos iguales, personal de minas, de procesos y de filtros de acuerdo con la jerarquía: personal superior y operarios, según se muestra en la Tabla 6.

Departamento	Jerarquía	Total personal	% en el lugar	Personas en guardia	Rotación de guardias
Administración	No Aplica	160	100%	160	No posee ida lunes y vuelta viernes
Mina	Superiores	143	50%	72	7x7 o 14x14
	Operador camión	136	50%	68	
	Operador otra disciplina	111	50%	56	
Planta de Procesos	Superiores	110	50%	28	7x7 o 14x14
	Operadores	190	50%	48	
Planta de Filtros	Superiores	20	50%	10	7x7 o 14x14
	Operadores	40	50%	20	

Tabla 6 - Caracterización del Personal

Los escenarios de la demanda quedaron configurados por la frecuencia de la rotación, de 7 o de 14 días, de los grupos establecidos para cada departamento, en las siguientes tablas se muestran la agenda quincenal de movimiento de personal:

Escenario	Día	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D
N°1 14x14	Arribos	160	72		92				160	68		76			
	Salidas		72		92	160				68		76	160		
N°2 7x7	Arribos	160	140		168				160	140		168			
	Salidas		140		168	160				140		168	160		

Tabla 7 - Escenario de Demandas Rotación Guardias 14x14 y 7x7

CONCLUSIONES

Las aeronaves Cessna 208B Grand Caravan, Fairchild Metro 23 y Dornier Do228 analizadas tienen capacidad de despegue, en su condición normal de operación, en aeródromos con elevación de 10000 pies.

Las distancias de aceleración parada (ASD) en estos casos fue 1370 m para el Dornier Do228, 2040 metros para el Fairchild Metro 23, ambos bimotores y 1875 metros para el Cessna Caravan monomotor, distancia que será la condicionante en la determinación de la longitud de la pista requerida. El resto de las distancias de despegue se presentan en la Tabla 8.

AVION	OTOW (kg)	FW (kg)	Alcance (km)	Cantidad de PAX (Kg)	ASD (m)	TOR (m)	TOD (m)
Fairchild Metro 23	6450	660	1000	16 (1600 Kg)	**2040**	1920	2130
Dornier Do228	5500	660	800	18 (1800 Kg)	**1370**	1300	1470
Cessna 208B Gran Caravan	3700	330	600	10 (1000 kg)	**1875**	1250	2145

Tabla 8 – Performance de las aeronaves

Entre los modelos evaluados, el Fairchild Metro 23 se destacó como la mejor opción por su equilibrio entre capacidad de carga, autonomía, requisitos de pista, seguridad de operación (bimotor), su amplio uso en la República Argentina que denota la existencia de talleres de mantenimiento con personal entrenado y personal operativo con experiencia en la aeronave.

Sumado a lo mencionado es la aeronave que presentó la distancia de aceleración parada más crítica, motivo por el cual se la adoptó como avión crítico de diseño, dando como resultado una pista con las siguientes distancias declaradas para el despegue.

TORA = 2000 metros ASDA = 2050 metros TODA = 2150 metros

Sobre esta base, el análisis determinó que solo los emplazamientos 5 y 6 permiten desarrollar una pista adecuada para la operación aérea del proyecto minero, dado que los emplazamientos 1, 2 y 4 presentan limitaciones de longitud y terreno. Sin embargo, su mayor elevación (12.000 pies) representa un desafío operativo para las aeronaves analizadas.

En términos de dimensionamiento de flota, considerando al día crítico de demanda que se corresponde con el jueves del Escenario Nº2 Rotación Guardias 7x7, requiere una agenda diaria de operación de 17 vuelos para el Cessna Grand Caravan, 11 vuelos para el Fairchild Metro 23 y 10 vuelos para del Dornier Do228, en todos los casos el dimensionamiento de la flota será entre 3 y 4 aeronaves.

Por último, para completar la planificación del sistema de transporte, será necesario:

1. Analizar las limitaciones de performance por gradiente de ascenso y obstáculos en el entorno.
2. Evaluar la eficiencia operativa, considerando la demanda de rotación de personal y la disponibilidad de aeronaves.
3. Estimar costos y viabilidad del sistema de transporte aéreo definido.

En función de estos factores, se recomendó avanzar en la evaluación del emplazamiento 5, dado que cumple con los requisitos de pista y minimiza el movimiento de suelos en comparación con el emplazamiento 6, y reevaluar el emplazamiento 3 con base a las distancias de despegue declaradas indicadas.

Referencias:

[1] ANAC (2025) Ley Nacional 17285 y modificatorias. Diciembre 2024. https://www.argentina.gob.ar/anac/normativa/resoluciones-y-disposiciones

[2] ANAC (2025) Regulación Argentina de Aviación Civil RAAC 91 y 135. Enero 2025. https://www.argentina.gob.ar/anac/raac-dnar-regulaciones-argentinas-de-aviacion-civil/raacRegulación Argentina de Aviación Civil RAAC 91 y 135.

[3] AC&A/UID GTA GIAI (2021) Estudio Conceptual de Ubicación De Pista Aérea Proyecto Minero - Informe Preliminar.

[4] Textron Aviation (2024) Type Certificate Data Sheet No. A37CE Cessna Grand Caravan Model 208B G1000.

[5] Fairchild Aircraft Group (2022) Type Certificate Data Sheet No. A5SW Metro 23

[6] Dornier (2025) Type Certificate Data Sheet No. A16EU Dornier 228 series

[7] UID GTA-GIAI (2021) Aviones analizados para el servicio aéreo de traslado de personal proyecto Minero II 210819

TRÁFICO AÉREO EN LA REPÚBLICA ARGENTINA POST PANDEMIA COVID-19

Pesarini Alejandro, Di Bernardi C. Alejandro, Pitrelli Sergio, Faut Rogelio

Grupo de Transporte Aéreo – UIDET "GTA-GIAI", Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 entre 47 y 48 s/n (1900) La Plata, Argentina. ajp@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los distintos criterios de confinamiento y asilamiento utilizados durante la pandemia de COVID-19, combinados con las estrategias para reducir las interacciones sociales (distanciamiento social, restricción de horarios de circulación, suspensión del transporte y el cierre de fronteras) tuvieron un efecto significativo en las actividades sociales, culturales y económicas en el mundo, la aviación no escapó a esto, afectándola significativamente a nivel mundial, regional, nacional y local.

Muchos trabajos se han realizado para determinar el impacto de la pandemia en el sector aéreo, evaluando en algunos casos el comportamiento del tráfico de pasajeros y de la carga, y en otros los siguientes aspectos: cantidad de quiebras y/o convocatorias de compañías aéreas, disminución en la fabricación de aviones para servicios comerciales, despido de personal aeronáutico del sector, cancelación de eventos aéreos de aviación.

En el presente se compara la recuperación del transporte aéreo comercial en el año 2023 a nivel mundial –internacional y doméstico- y la acontecida en la República Argentina, concluyendo respecto de las tasas observadas.

En segundo lugar, compráramos las proyecciones de crecimientos del tráfico a nivel mundial con las tasas obtenidas para el tráfico de la República Argentina.

Por último, incorporamos un análisis preliminar de amenazas y oportunidades, que incluye como factor la modificación al código aeronáutico Ley 17285 de diciembre de 2023 y la puesta en vigencia de nuevas regulaciones.

PANDEMIA COVID-19

La pandemia fue la crisis de salud más grande desde la Segunda Guerra Mundial, desde su aparición en China a finales del año 2019, el virus llegó a cada región, aumentando a diario su transmisión durante el 2020.

Los países se enfrentaron a la propagación de la enfermedad, dando tratamiento a los pacientes, rastreando los contactos estrechos, limitando los viajes, desarrollando estrategias de aislamiento social y/o disponiendo en cuarentena a los contactos estrechos y sintomáticos, y limitando la asistencia del público a eventos de asistencia masiva sean deportivos, recitales/conciertos e instituciones de enseñanza en todos sus niveles.

El desarrollo de las vacunas, la solución, fue una carrera contra el tiempo, inmersa también en peleas políticas que respondieron especialmente a cuestiones económicas.

Pero el COVID-19 fue mucho más que una crisis de salud tuvo el potencial de crear dificultades sociales, económicas y políticas.

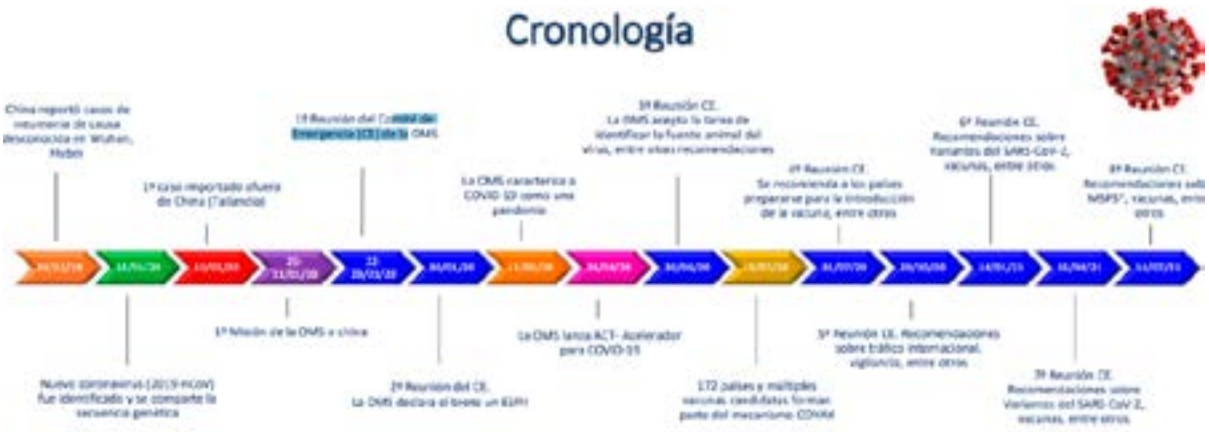


Figura 1- Línea de tiempo Covid-19 Fuente: Organización Panamericana de la Salud

El sistema aéreo no escapó a esta situación, la crisis en el trasporte aéreo comercial fue una de las más larga de las últimas décadas. La recuperación del mercado, medido como ingreso por pasajero transportado (RPK), demoró más de 4 años (48 meses).

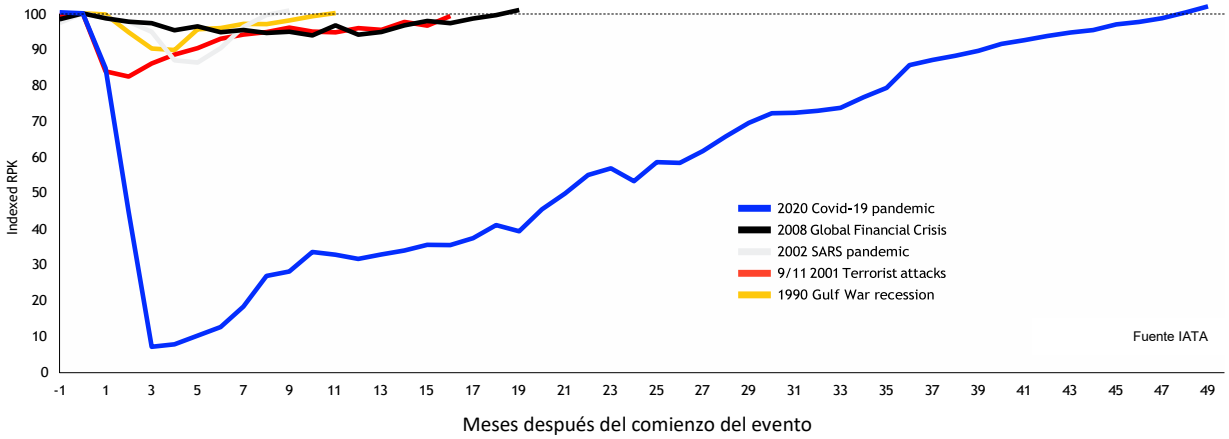


Figura 2- Recuperación del mercado. Fuente IATA [5][6]

Comparando este índice (RPK) con su evolución en otras importantes crisis que afectaron al transporte aéreo, la pandemia Covid-19 cuatriplicó a las que tuvieran un impacto mayor: la crisis financiera global del 2008 y el atentado terrorista 9/11.

COMPORTAMIENTO POSPANDEMIA DEL MERCADO MUNDIAL DE PASAJEROS

El mercado aéreo mundial de pasajeros alcanzó los niveles prepandémicos en el año 2023, habiendo transcurrido más de 4 años, es decir la pandemia Covid-19 tuvo un impacto de más de 48 meses en el tráfico aéreo doméstico e internacional de pasajeros.

Tipo de Pax Año	2019	2020	2021	2022	2023
Domestico (millones de pasajeros)	2.635	1.300	1.764	2.266	2.632
% crecimiento respecto a 2019	Referencia	-50,7	-33,1	-14,0	-0,1
Internacional (millones de pasajeros)	1.908	457	527	1.220	1.865
% crecimiento respecto a 2019	Referencia	-76,0	-72,4	-36,1	-2,3
Total (millones de pasajeros)	4.543	1.757	2.291	3.486	4.497

Tabla 1- Recuperación del mercado medido en pasajero transportado. Fuente IATA

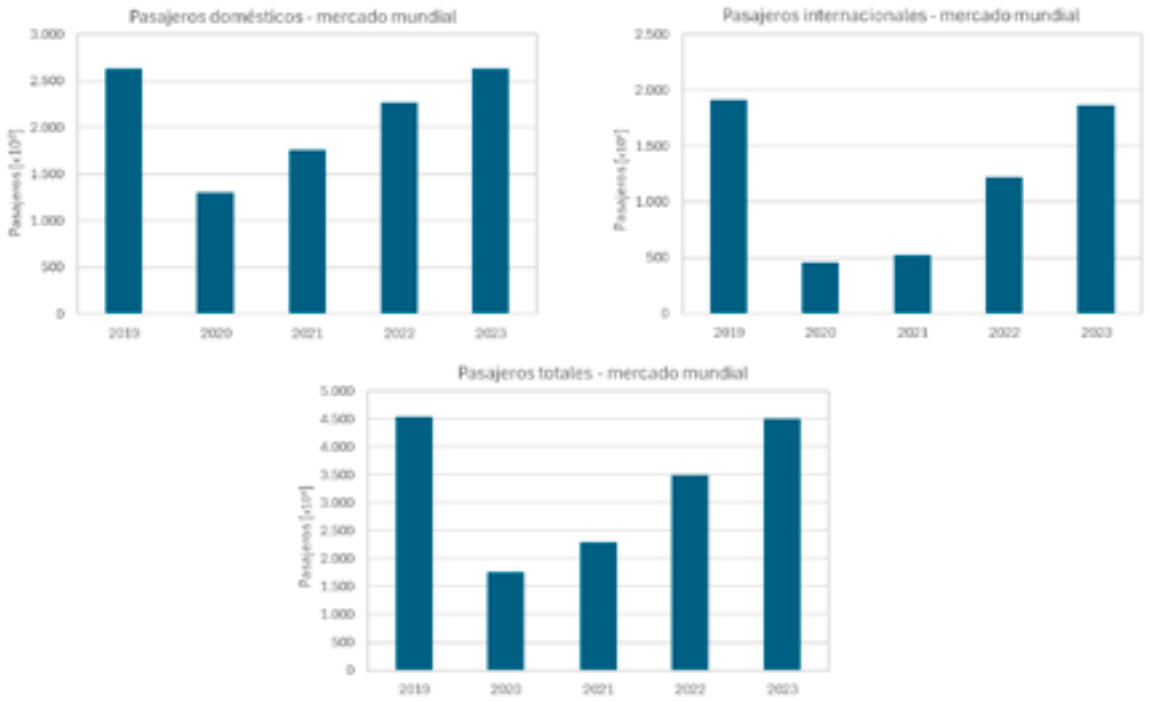


Figura 3- Comportamiento tráfico mundial pasajeros domésticos e internacionales

Según los datos de la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA) [1], el **transporte aéreo mundial** de pasajeros siguió en recuperación, cerrando en diciembre de 2023 con cifras muy próximas a los niveles prepandémicos anuales. El tráfico global en 2023, medido en ingreso por pasajeros-kilómetro transportados (RPK) se situó en el 94,1% respecto a niveles prepandémicos y el volumen total en el 99%. Los RPK de diciembre de 2023 se situaron en un 97,5% respecto a diciembre de 2019.

IATA indica que el **tráfico internacional a nivel global** [2] en 2023 medido en pasajero transportado fue del 98% respecto a 2019, en diciembre de 2023 se ubicó en el 94,7% respecto a diciembre de 2019. Además, se observa que el **tráfico doméstico global** creció un 30,4% interanual y se situó un 3,9% por encima de niveles de 2019. El tráfico doméstico mundial de diciembre de 2023 se ubicó un 2,3% por encima del dato de diciembre de 2019.

COMPORTAMIENTO POSPANDEMIA DEL MERCADO ARGENTINO DE PASAJEROS

El mercado aéreo argentino, medido como pasajeros totales transportados, alcanzó los niveles prepandémicos luego de más de 4 años, replicando el impacto a nivel mundial observado.

Tipo de Pax Año	2019	2020	2021	20022	2023
Nacional (pasajeros)	16.072.981	3.671.139	6.181.078	13.580.286	17.342.625
% crecimiento respecto a 2019	Referencia	-77,2	-61,5	-15,5	7,9
Internacional (pasajeros)	14.376.406	3.443.977	1.997.518	8.171.167	11.742.816
% crecimiento respecto a 2019	Referencia	-76,0	-86,1	-43,2	-18,3
Total (pasajeros)	30.449.387	7.115.116	8.178.596	27.160.572	29.085.441

Tabla 2- Recuperación del mercado argentino. Fuente ANAC [3]

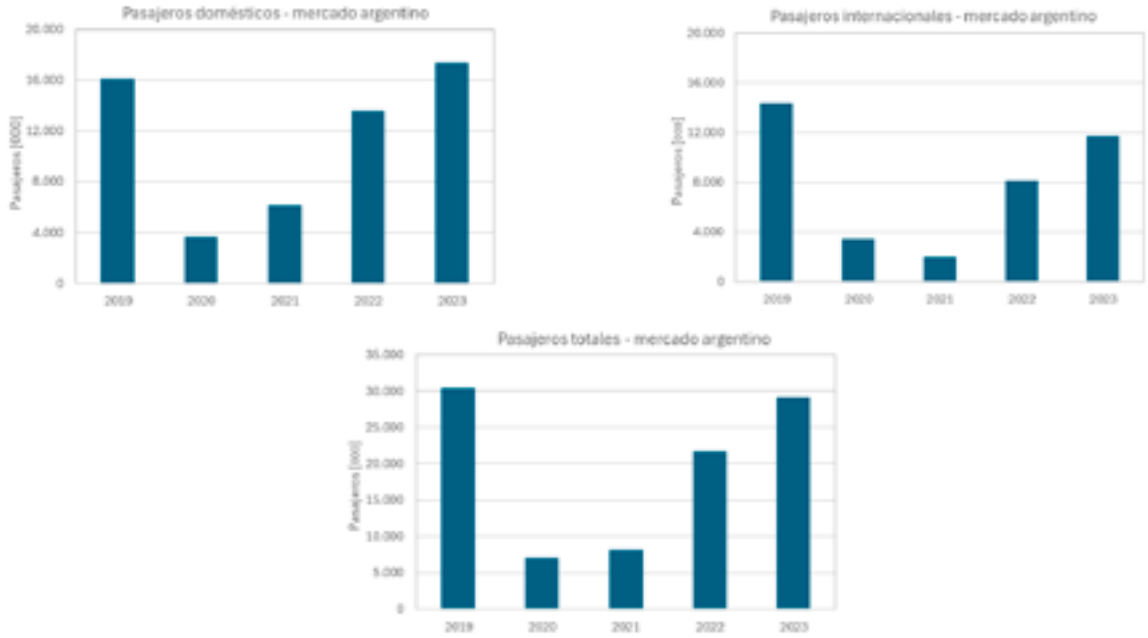


Figura 4-Comportamiento tráfico argentino de pasajeros doméstico, internacional y totales.

En la **República Argentina el tráfico internacional** en 2023 fue del 81% respecto a 2019, en tanto que en diciembre de 2023 se ubicó en el 95,6% respecto al mismo mes de 2019. Además, se observa que el **tráfico doméstico en Argentina** creció un 27,70% interanual y se situó un 7,9% por encima del nivel de 2019, en tanto que el tráfico de cabotaje de diciembre de 2023 se ubicó un 4,4 % por debajo del dato de diciembre de 2019.

AÑO 2024 Y PROYECCIONES DE TRÁFICO

El mercado aéreo argentino de transporte de pasajeros presentó en el año 2024 un estancamiento de la demanda, se encontró por debajo del nivel del tráfico prepandémico, año 2019. El tráfico internacional de pasajeros continua con su tendencia de crecimiento de más del 10% anual, en tanto que el de cabotaje presentó una inversión en su tendencia.

Tipo de Pax / Año	2019	2020	2021	20022	2023	2024
Nacional (pasajeros)	16.072.981	3.671.139	6.181.078	13.580.286	17.342.625	15.881.000
% crecimiento respecto 2019	Referencia	-77,2	-61,5	-15,5	7,9	-1,2
Internacional (pasajeros)	14.376.406	3.443.977	1.997.518	8.171.167	11.742.816	13.429.000
% crecimiento respecto 2019	Referencia	-76,0	-86,1	-43,2	-18,3	-6,6
Total (pasajeros)	30.449.387	7.115.116	8.178.596	27.160.572	29.085.441	29.757.033

Tabla 3- Comportamiento año 2024 del mercado argentino. Fuente ANAC

A nivel global según IATA el tráfico aéreo de pasajeros alcanzó y superó en el año 2024 los niveles prepandémicos, la tasa anual de crecimiento de trasporte de pasajeros totales aún son superiores a las previas en la pandemia Covid-19 que eran del orden del 6%, estableciéndose en el doble de su magnitud.

Tipo de Pax / Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Domestico (millones de pasajeros)	2.635	1.300	1.764	2.266	2.632	2.969
% crecimiento	Referencia	-50,7	-33,1	-14,0	-0,1	12,0
Internacional (millones de pasajeros)	1.908	457	527	1.220	1.865	1.995
% crecimiento	Referencia	-76,0	-72,4	-36,1	-2,3	4.5
Total (millones de pasajeros)	4.543	1.757	2.291	3.486	4.497	4.964

Tabla 4- Recuperación año 2024 del mercado. Fuente IATA

Las proyecciones para el tráfico en la República Argentina considerando un escenario neutro indican que recién en el trascurso del año 2025 y 2026 se alcanzarán los niveles que hubiéramos tenido sin los efectos de la pandemia, recuperando en dicha instancia las tasas de crecimiento anuales.

PASAJEROS REPUBLICA ARGENTINA	PROYECCION 2024-2027 CONSIDERANDO LOS DATOS DE TRÁFICO DE LA PANDEMIA REFERENCIA 2019			PROYECCION 2024-2027 CONSIDERANDO LOS DATPOS DE TRÁFICO SIN PANDEMIA REFERENCIA 2019		
Año	Pax totales (%)	Pax cabotaje (%)	Pax internacionales (%)	Pax totales (%)	Pax cabotaje (%)	Pax internacionales (%)
2015	72	64	82	72	64	82
2016	78	68	89	78	68	89
2017	90	79	102	90	79	102
2018	96	89	105	96	89	105
2019	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
2020	23	23	24	109 P	108 P	111 P
2021	27	38	14	117 P	117 P	116 P
2022	89	84	57	124 P	126 P	121 P
2023	96	108	82	131 P	135 P	127 P
2024	98	99	93	139 P	144 P	132 P
2025	127 P	137 P	116 P	146 P	154 P	137 P
2026	149 P	159 P	137 P	153 P	163 P	142 P
2027	160 P	172 P	147 P	160 P	172 P	147 P

Tabla 5. Proyección Pasajeros República Argentina: “P” Dato Proyectado

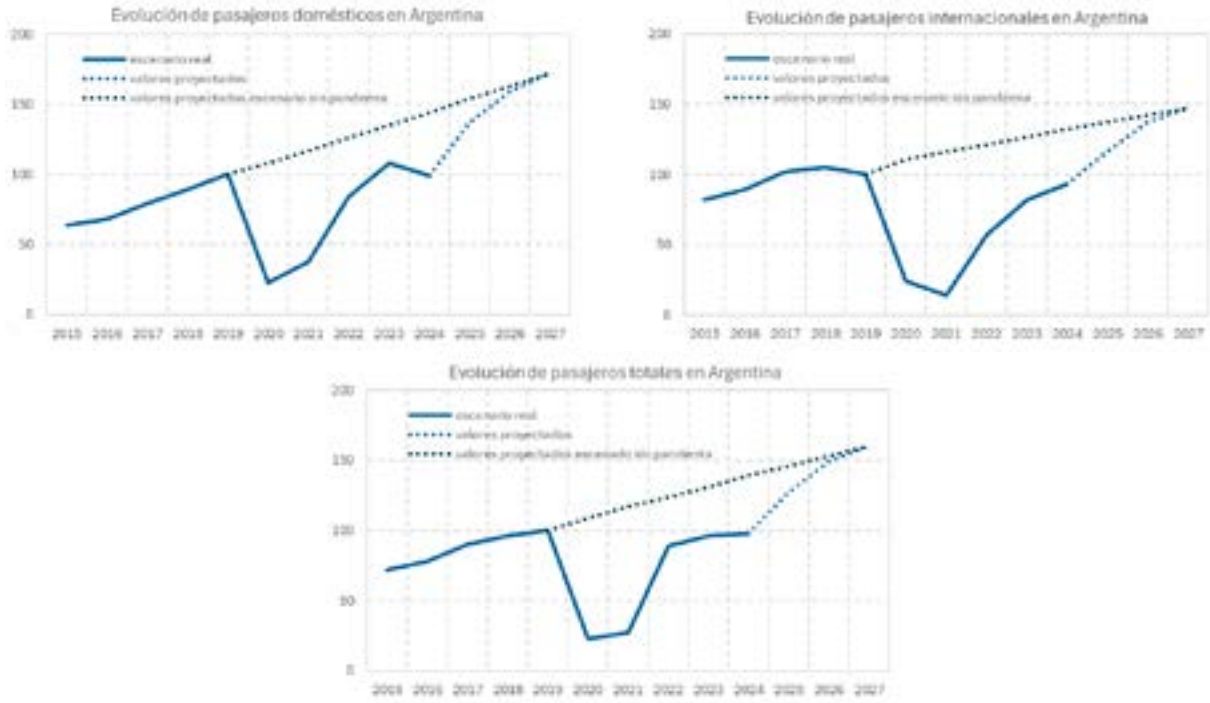


Figura 5- Datos observados y proyección 2027

AMENAZADAS Y OPORTUNIDADES

Se ha puesto en evidencia que la rentabilidad del sector es frágil, y se ve afectada por distintos factores, la preocupación hoy de los analistas de riesgo recae sobre los siguientes aspectos:

La economía mundial: Los resultados económicos de las líneas aéreas están vinculadas a las tendencias económicas mundiales, sin embargo, el sector ha resistido a la inflación, a las elevadas tasas de interés y al bajo crecimiento del Producto Bruto Interno de cada región luego de la pandemia. La evolución del mercado asiático especialmente el de China, el

desarrollo de las políticas exteriores de los Estados Unidos de América, tendrán un impacto en nuestra economía y como resultado en el sector de transporte aéreo comercial.

Las guerras: El impacto de las guerras, Rusia-Ucrania e Israel-Hamás, no ha trascendido más allá de las regiones de conflicto, sin embargo, podrá configurarse como una amenaza en la medida que haya una escalada de estos.

Las medidas políticas en Argentina: Se afrontan cambios significativos de las políticas, las modificaciones al código aeronáutico Ley 17285 de diciembre de 2023 y la puesta en vigencia de nuevas regulaciones con una política orientada a los "cielos abiertos" tendería a favorecer el tráfico aéreo internacional, pero en posible detrimento de la línea aérea de bandera y del tráfico de cabotaje.

Los cambios de la regulación: No parece ser hoy un factor influyente en el desarrollo del sector, exclusivamente hablamos de cambios que afectan prácticas operativas o cuestiones técnicas de las aeronaves.

CONCLUSIONES

Surgen del análisis del tratamiento de los datos presentados las siguientes conclusiones:

- A nivel global, la recuperación del tráfico comercial de pasajeros demandó más de 48 meses.
- Ha sido la peor de las crisis que afectó al sector aéreo comercial.
- En la Argentina se espera de acuerdo con las proyecciones realizadas que la recuperación de tráfico comercial de pasajeros ocurra entre los 72 y 84 meses, o sea durante el año 2026 y transcurso del 2027.
- Las modificaciones en las regulaciones locales, con cambio que transitan hacia una política de "cielos abiertos", tendrá necesariamente un impacto, que será positivo en el tráfico internacional de pasajeros, y neutro o negativo en el tráfico de pasajeros de cabotaje.
- Se observa que el tráfico comercial de pasajeros de cabotaje presentó un pico en el año 2023, pudiéndose deber a un error en la recolección de datos, o bien a un incremento de la demanda por las postergaciones de los años anteriores.
- El atraso en la recuperación del sector aéreo comercial en la argentina se debe a la crisis económica y financiera local que persiste hoy en día.
- Las decisiones políticas comerciales, interiores y exteriores, de los Estados Unidos de América tendrán un impacto en el sector aéreo comercial internacional y local.

Referencias:

[1] IATA (2024) La demanda global del transporte aéreo pasajeros continuó recuperándose en 2023.//www.iata.org/contentassets/b4cc9013a14c4a1e877728246de9738f /2024-01-31-02-sp.pdf

[2] IATA Mejora la previsión de aerolíneas para 2024. www.iata.org/contentassets/1cf212b329d54614bc7565dac38672ea/2024-06-03-01-sp.pdf

[3] ANAC (2025) Estadísticas de tráfico aéreo ANAC. Diciembre 2024. https://datos.anac.gob.ar/estadisticas/channel/e3d75bdf-0072-4dbf-867a-38ff42b8b803/

[4] The Moodie Davitt Moodie report. (2024). https://moodiedavittreport.com/global -air-travel-demand-reaches-94-of-pre-pandemic-levels-says-iata/

[5] IATA (2024) Air Passenger Market Analysis. Record-breaking year ends on a note.

[6] IATA (2024) Global Outlook for Air Transport. Deep Change.

AVIEM AV100 EPOWER, PRIMER AVIÓN ELÉCTRICO DE ARGENTINA DESARROLLADO POR LA UNIVERSIDAD PÚBLICA Y UNA EMPRESA PRIVADA

Rimoldi Claudio[1], Garaventta Guillermo[1,2], Garaventta Pascual Santiago[1], León Guacheta Neyder[1], Acerbo Ernesto[3], Actis Marcos[1]

(1) Centro Tecnológico Aeroespacial – Dpto. de Ing. Aeroespacial – FI - UNLP, (2) CIC – PBA, (3) AVIEM Aeronáutica SRL Arroyo La Choza, General Rodriguez. crimoldi@ing.unlp.edu.ar, guillermo.garaventta@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El mundo está experimentando un cambio substancial respecto al uso de las llamadas energías de baja emisión o energías libres de emisiones en vehículos terrestres.

En la industria aeronáutica se ha incursionando también en el desarrollo de aviones propulsados con energía eléctrica pero a un paso no tan marcado como en movilidad terrestre. A modo de referencia empresas como Pipistrel (Eslovenia) o Roll Royce (RU) tienen importantes avances en la aplicación de sistemas eléctricos de propulsión en la aviación. Por otra parte la Autoridad Europea de Aviación (EASA) generó estándares para regular y certificar estas tecnologías en la industria aeroespacial.

A nivel nacional, desde el año 2012, el Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Plata ha estado trabajando tanto en electro movilidad terrestre y en el desarrollo de baterías de litio ion para uso espacial. Las experiencias adquiridas, el know how alcanzado, ha servido para desarrollos complejos de electro movilidad como es el caso del ómnibus eléctrico (acuerdo entre el CTA y una empresa de colectivos de la ciudad de La Plata) o bien las baterías desarrolladas para el proyecto del lanzador Argentino Tronador II. Sobre la base de estas experiencias y en vista de hacia dónde se está direccionando el mundo en el campo aeronáutico con el uso de energía eléctrica para la propulsión, se comenzó a trabajar en la idea conceptual de desarrollar una aeronave eléctrica. A finales del 2020 se comenzó a analizar el mercado, disponibilidad de motores de tipo brushless, pilas, electrónica, etc y por otro lado sobre qué plataforma (avión) de fabricación nacional podría ser incorporado un sistema moto propulsor eléctrico. Contar con un avión de fabricación nacional del cual se tuviera acceso a sus performances y otras características técnicas permitió allanar el camino para concretar el proyecto. Luego de un año y medio de trabajo y con suficiente información técnica analizada el Director del CTA, Dr. Actis, se puso en contacto con el Ing. Aer. Ernesto Acerbo, egresado de nuestra Facultad. El Ing. Acerbo es socio Gerente de la empresa AVIEM Aeronáutica S.R.L., ellos contaban con la plataforma adecuada para nuestro proyecto, este avión es el modelo AV 100, propulsado con un motor alternativo de cuatro tiempos.

Se firmó un convenio específico entre la empresa AVIEM Aeronáutica S.R.L y la UNLP, Facultad de Ingeniería, CTA, Departamento de Ingeniería Aeroespacial. Posteriormente nos presentamos a la Convocatoria Específica POTENCIAR INDUSTRIA SATELITAL Y AEROESPACIAL, financiado por el Ministerio de Desarrollo Productivo, Secretaría de Industria, Economía del Conocimiento y Gestión Comercial Externa; en diciembre del 2021 fue aprobado nuestro proyecto.

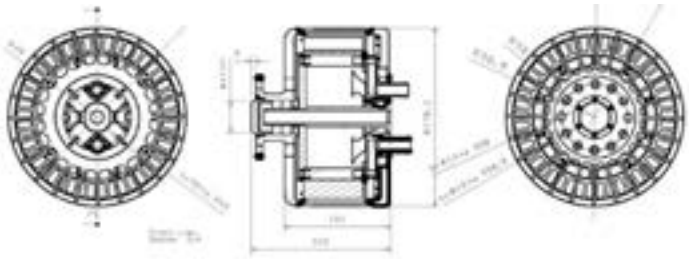
Desarrollo del trabajo

Estimación de la capacidad de la batería, potencia del motor y peso vacío del avión con propulsión eléctrica

Basados en las performances del avión AV 100, se realizó la estimación de la potencia necesaria del motor eléctrico a utilizar en el proyecto, la capacidad de la batería, su configuración, pesos preliminares y modificaciones estructurales a ser realizadas sobre la aeronave. Del análisis de la performance, y luego de varias iteraciones, se obtuvo el siguiente cuadro que representa el perfil de vuelo del avión eléctrico para cumplir con el objetivo del proyecto, obtener un certificado de aeronavegabilidad experimental para investigación y desarrollo y volar durante una hora con dos personas.

	Tiempo (min)	Tiempo (horas)	Potencia del motor		Energía (kWh)
			kW	HP	
Despegue	2	0,033	70	94,0	2,33
Crucero económico	55	0,917	50	67,1	45,83
Aterrizaje	3	0,050	40	53,7	2,00

La energía total resultó de 50,81 kWh a la cual se le suma un 5% de reserva obteniéndose una energía final de batería de 52,68 kWh. A partir de estas estimaciones se procedió a definir la potencia del motor eléctrico a utilizar en el proyecto. Habiendo evaluado diferentes alternativas se optó por un motor brushlees del fabricante ROTEX electric, modelo REB90, tipo out runner, con refrigeración mixta (aire y líquido). En la figura 1 se presenta las dimensiones del motor y especificaciones técnicas.



Potencia: 80 kW a 2800 rpm

Máximo torque: 300 Nm

Peso: 23 kg (sin líquido refrigerante)

Figura 1

Con el objeto de mantener las condiciones de estabilidad y de vuelo del avión, se trabajó sobre la distribución de masas con el fin de mantener el centro de gravedad de la aeronave dentro de los límites establecidos por análisis de estabilidad. Para lograr esto fue necesario dividir la batería en dos módulos, uno llamado master y otro denominado slave (esclava). La primera resultó con una masa de 140 Kg mientras que la masa de la slave fue de 160 kg. Estos valores preliminares fueron los utilizados para los cálculos estructurales.

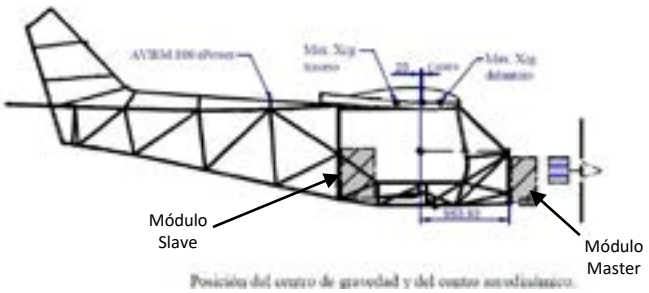


Figura 2

Respecto a las condiciones de vuelo se modificó, aumentó, la superficie del ala respecto a la del AV 100 con el de fin de mantener similares condiciones de carga alar y velocidad de pérdida. El avión propulsado con potencia eléctrica resulta más pesado que el avión original. Con los pesos estimados y distribuidos, definido los conductores eléctricos y otros subsistemas, se procedió a la modificación de la estructura del avión para instalar los componentes del sistema. De este proceso se estableció un peso vacío del avión de 540 kg.

Modificaciones estructurales, condiciones de cargas y verificación estructural por FEM

La figura 3 es un CAD con la disposición final de las cajas de la batería, controlador y motor. A partir de esto se procedió a diseñar y calcular las estructuras soportes de los componentes bajo las condiciones de cargas establecidas en regulaciones internacionales[1].

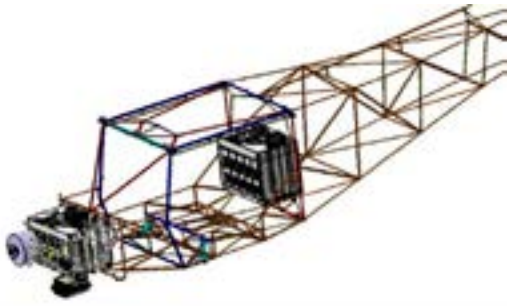


Figura 3

En la siguiente tabla se presentan los factores de carga utilizados y los estados de carga considerados (once en total) para el análisis estructural de las modificaciones. Se utilizó el método de elementos finitos para este análisis.

Factores de carga		
n_0	factor de carga vuelo recto y nivelado	1
n_1	factor de carga limite positivo	4
n_2	factor de carga limite negativo	-2
n_l	factor de carga lateral	1.5
n_{r1}	factor de carga de rafaga para crucero	4,1

Estados de cargas		
Nro	Descripcion	Cargas combinadas
E1	Diseño bancada motor crucero	0,75*T + Q + (FS)*W*n_{r1}
E2	Diseño bancada motor limite	T + Q + (FS)*W*n1
E3	Diseño bancada lateral	(FS)*L*n_l
E4	Maniobra positiva con motor	T + (FS)*W*n_1
E5	Maniobra positiva sin motor	(FS)*W*n_1
E6	Maniobra invertida con motor	T + (FS)*W*n_2
E7	Maniobra invertida sin motor	(FS)*W*n_2
E8	Desaceleración de la helice	D + (FS)*W*n_0
E9	Hard landing Forward	9*F
E10	Hard landing Up	-3*W
E11	Hard landing Lateral	1.5*L

El estado de carga E9 resultó ser el más crítico para la estructura, comprometiendo a un tubo posterior de la estructura del fuselaje (tensión de Von Mises de valor semejante a la tensión 02 del material, tubo de acero aleado, sin costura, 4130 Normalizado), un tubo lateral del fuselaje (pandeo) y el soporte estructural de la caja master, ubicada en la bancada delantera, dando los siguientes resultados.

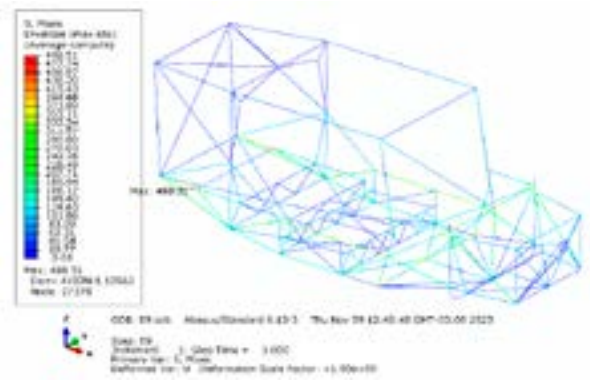


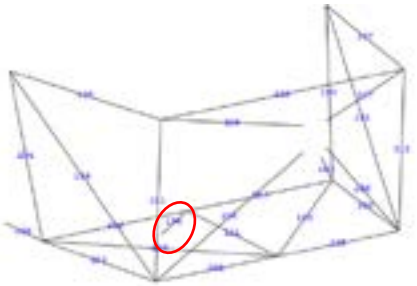
Figura 4

El soporte de la caja master de la batería, bancada de nariz, figura 4, resulto con el siguiente estado tensional crítico.

Maxima solicitacion Bancada Nariz

	Barra	σ_x	σ_{crit}	R	MS
Condicion mas solicitada E9	194	327.64	517.10	0.86	0.17

Figura 5



Desarrollo de la batería

Posee una configuración tipo 95S49P. Está constituida por dos módulos como fue comentado antes, uno de 42 celdas en serie y 49 paralelos (Master Box) y otro de 53 celdas en serie y 49 en paralelo (Slave Box). Estos módulos de baterías están compuestas por celdas de litio-ion de alta densidad de energía (mayor a 240 Wh/kg) de tecnología NMC (nickel, manganeso, cobalto).
Cada módulo se aloja dentro de una caja contenedora, en ella están los conectores de entrada y salida, y el sistema de refrigeración por aire (Fanes).
La siguiente imagen muestra el esquema eléctrico de los dos módulos (Master y Slave Box).

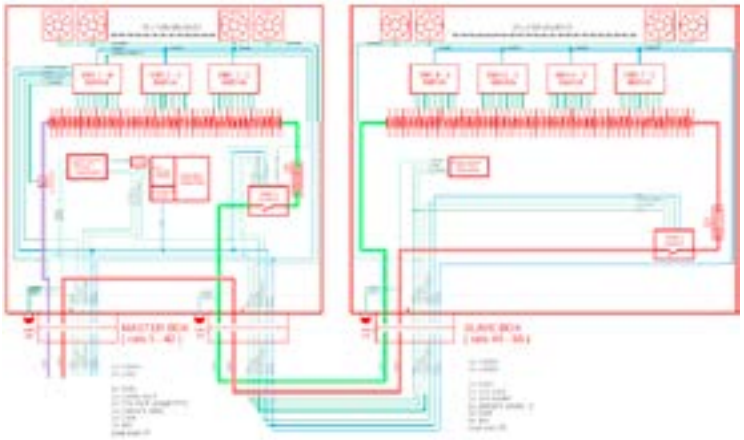


Figura 6

Dentro de los módulos se encuentran los BMS (Battery Managment Systems), encargados del control de carga, balanceadores de tensiones de celdas o pilas. Estos pueden balancear hasta 16 celdas. Los BMS del módulo slave también pueden balancear hasta 16 celdas actuando como esclavo del controlador principal. Otros componentes son los contactores electrónicos, fusibles de protección, un medidor de corriente y una batería auxiliar de 12V para la alimentación en baja tensión de los sistemas electrónicos internos.

Las pilas utilizadas corresponden al modelo US18650VTC6, marca Sony, de 3Ah de capacidad. Esta posee herencia de aplicación en el área espacial y aeronáutica.

Para nuestra aplicación tuvimos en cuenta que la máxima corriente de descarga solo se producirá durante la fase de despegue, esta pila puede drenar corrientes de descarga hasta 20A. Esto significa que, en términos de ¨C¨, es equivalente a drenar 6,7C amperes. En el despegue la corriente máxima no será superior a 2C (6A) en las pilas lo que equivale a 294A totales en batería (6A*49celdas). Esta limitación se programa en el BMS Master limitando la máxima corriente de descarga permitida. En caso que el sistema detecte una corriente mayor, el sistema reduce la potencia del motor eléctrico a través de su controlador. El controlador es un equipo electrónico capaz de trabajar con corrientes máximas de 400A con un rango de voltaje de operación entre 120 y 400 V (bajas y medias

tensiones). La electrónica del sistema está contenida en una caja con protección IP67 (resistente al polvo y al agua). El acceso a la unidad se realiza mediante una conexión CAN permitiendo setear parámetros de funcionamiento del sistema y por otro lado, evaluación el estado de las pilas.

Ensayos estáticos en tierra con el fin de corroborar, obtener parámetros típicos y validar resultados teóricos

Instalados todos los componentes del sistema de propulsión eléctrica en el fuselaje del avión AVIEM 100 Epower, el conjunto fue trasladado desde Gral. Rodriguez al hangar de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Aeródromo Ensenada, Aero Club La Plata, Figuras 7 y 8.





Figuras 7 y 8

Los ensayos llevados a cabo tuvieron como fin adecuar el paso de la hélice (hélice de paso variable en tierra) para cumplir, simultáneamente, con una adecuada tracción en el despegue y en vuelo de crucero. Posteriormente se procedió a determinar curvas características como la que relaciona a la tracción del sistema moto con las RPM del motor, potencia consumida, etc.
A continuación se presenta la curva de tracción vs potencia motor.

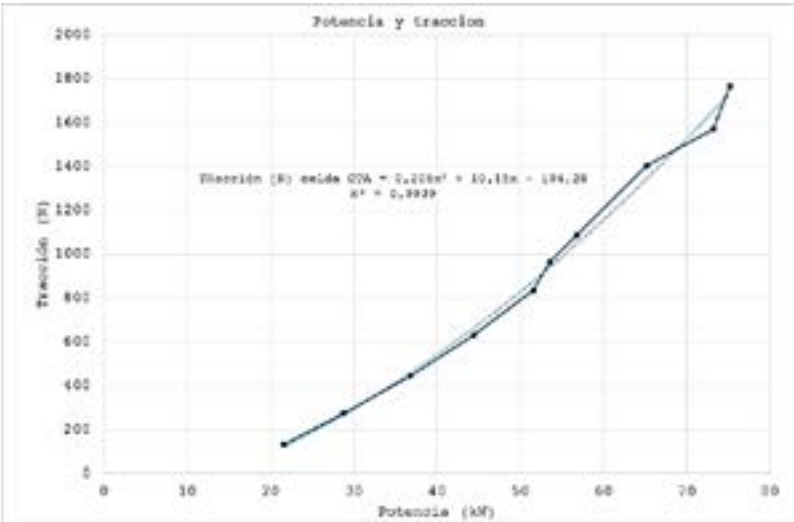


Figura 9

Los valores de carga de tracción se establecieron utilizando una celda de carga perteneciente a GEMA – CTA, los datos de potencia se obtuvieron del software propio del controlador. Los ensayos se realizaron hasta las 2500 RPM y no hasta las 2800 por limitación de la hélice.
De los ensayos se obtuvo que a 2500 RPM la corriente máxima de batería fue de 250 A y 75,2 kW de potencia y en condición de crucero, a 1800 RPM fue de 120 A y 51,6 kW.

Con los valores de corriente, potencia a diferentes revoluciones y otros parámetros se estimó que la energía a utilizar, para una hora de vuelo, correspondería a un total de 50,81 kWh, inferior a la energía, con reserva, del diseño de la batería (52,7 kWh).

Actividades preliminares antes del vuelo y primer vuelo de un avión eléctrico en Argentina

Finalizados los ensayos en tierra el avión fue trasladado al aeródromo de la EAA, allí la empresa AVIEM montó las alas, instrumentos de vuelo, realizó la puesta en orden de los sistemas de comandos, etc. Se realizaron pruebas de carga y descarga de las baterías, superadas las pruebas funcionales los inspectores de la autoridad aeronáutica (ANAC) procedieron con la inspección de la aeronave; la inspección se desarrolló durante cuatro días de exhaustivo análisis.

Finalizada las inspecciones se emitió un certificado de aeronavegabilidad experimental para investigación y desarrollo habilitando la aeronave para realizar el vuelo de prueba.



Figura 10, Certificado de aeronavegabilidad emitido.

El vuelo duró diez minutos, no fue factible relevar suficientes datos de vuelo debido al poco tiempo que duró éste.

Conclusiones

Se pudo cumplir con los objetivos del proyecto demostrándose que es factibilidad volar con un avión propulsado con energía eléctrica, este es el primer paso que dio el País en este campo. Los valores de potencia utilizados en el despegue resultaron semejantes a los calculados y respecto a la condición de vuelo de crucero la potencia utilizada (35 kW ó 46 HP) fue inferior a la calculada, esto permite estimar que el vuelo final podrá superar la hora predeterminada. Por otra parte se abren las puertas para seguir desarrollando esta tecnología en el país incluyendo esto a la autoridad aeronáutica que deberá involucrarse en esta nueva manera de propulsión con el fin de desarrollar o adaptar regulaciones internacionales como la utilizada aquí.

Bibliografía

- [1] ASTM F 2245 – Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane.
- The Design of the Airplane – D. Stinton
- AC-43-13 Federal Aviation Administration
- Data sheet: US18659VCT6.pdf

Agradecimientos: Al CTA, a AVIEM**.** El Ing. Garaventta agradece a la CIC-PBA por su apoyo.

MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE ACELERACIONES CAUSADAS POR CARGAS DE SHOCK EN ESTRUCTURAS

Trabucco, Franco, Marranghello,Tomás, Martínez del Pezzo, Andrés y Figueroa, Fernando
franco.trabucco@ing.unlp.edu.ar

Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA)
Departamento de Aeronáutica - Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
Calle 1 y 47, CP 1900
La Plata – Argentina

INTRODUCCIÓN

Las estructuras aeroespaciales pueden ser sometidas a cargas debidas a cargas de shock las cuales pueden ser generadas por diferentes fuentes como la separación de etapas, apertura de cofia, liberación de carga paga, maniobras, etc. Debido a la gran complejidad y costo computacional de evaluar impulsos de corta duración como es el shock en estructuras aeroespaciales, se suelen utilizar métodos simplificados en la etapa de diseño como las curvas SRS, las que se basan en un sistema de un solo grado de libertad, esto lo hace un método sencillo de utilizar y calcular a expensas de la precisión de los mismos, siendo típicamente muy conservativo y no teniendo en cuenta el punto exacto de aplicación de la carga de shock. Por esto se exploran otros métodos simplificados que permitan obtener respuestas aproximadas para el diseño sin un excesivo costo computacional.

OBJETIVOS

Se busca comparar ensayos de shock realizados y diferentes métodos de análisis de los efectos de las cargas de shock incluyendo el método de espectro de respuesta basado en las curvas SRS y el método de superposición modal transitorio (SMT), analizando como primera configuración una estructura simple que permita evaluar el método en condiciones ideales y como segunda configuración una estructura compleja, que permita evaluar los métodos en casos no ideales (frecuencias naturales cercanas, influencia de juntas, etc.). Además, se buscan obtener de los ensayos los valores de amortiguamiento de las estructuras.

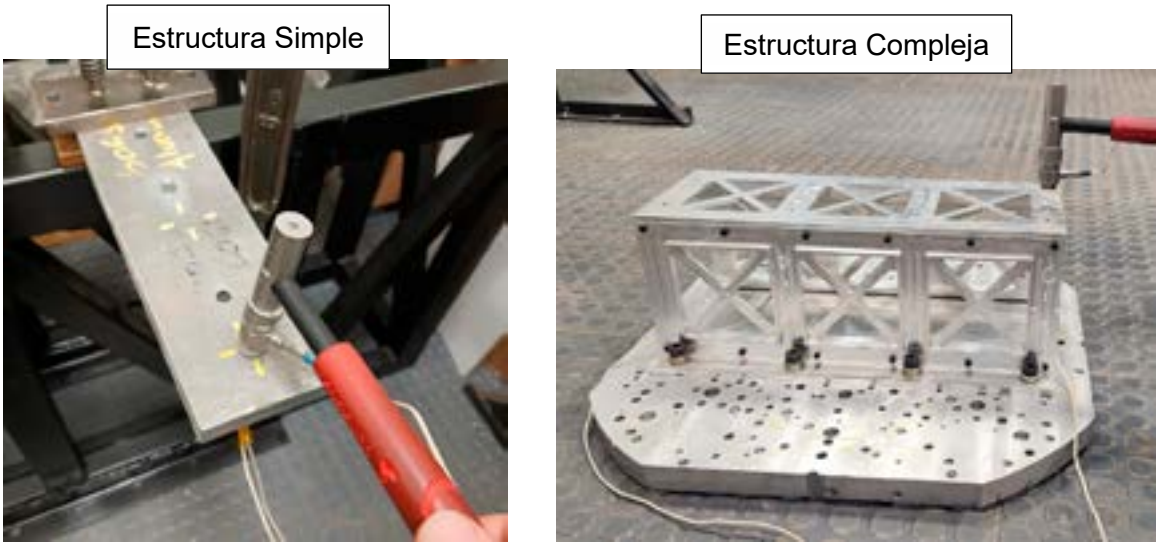


Figura 1. Estructuras

PARTE EXPERIMENTAL

METODOLOGÍA

En los ensayos de shock realizados en ambas estructuras, se aplica un impacto (shock) con un martillo modal, que permite medir la fuerza de impacto, por otro lado, se obtiene la respuesta de aceleración de la estructura mediante acelerómetros en dos puntos de la misma, uno de ellos en la zona de impacto (punto emisor) y otro en otro punto de la estructura (punto receptor). La cantidad de acelerómetros se limita a 2 para permitir una mayor frecuencia de adquisición de muestras. En particular para la estructura compleja se toman diferentes configuraciones, donde se mantiene el punto emisor (A) y se varía el punto receptor (B, C y D)

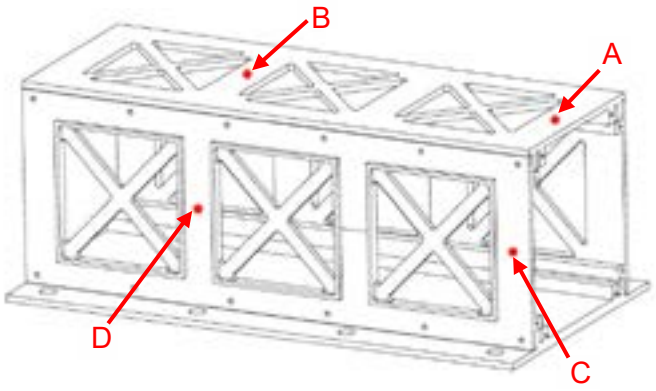


Figura 2. Puntos de medición

A partir de las aceleraciones obtenidas en el punto emisor se obtienen las curvas SRS, utilizando un factor de calidad típico de $Q = 10$ ($\varepsilon = 5\%$).

A los resultados de aceleración se les aplica la transformada de Fourier de corta duración (STFT), obteniendo de estos resultados las frecuencias naturales del sistema a partir de los picos de amplitud de la aceleración persistentes en el tiempo, y el coeficiente de amortiguación, a partir del decaimiento exponencial de la amplitud en el tiempo para la frecuencia natural a analizar. Para el caso de la estructura compleja, se analiza también la diferencia de fase entre emisor y receptor, permitiendo obtener el sentido relativo de las aceleraciones respecto al emisor, con lo que puede estimarse la deformada del modo asociado con una frecuencia natural.

DESARROLLO

ESTRUCTURA SIMPLE

Del ensayo se obtienen las siguientes fuerzas aplicadas y aceleraciones.

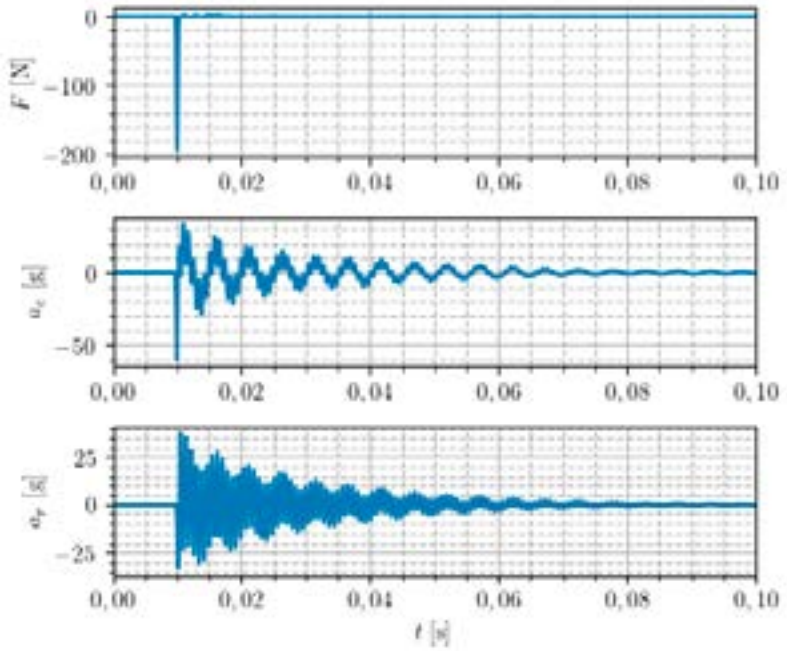


Figura 3. Mediciones en la estructura simple

Tabla 1. Picos de estructura simple.

	Aceleración [g]	
	Máxima	Mínima
Emisor	33,62	-60
Receptor	37,66	-33,26

A partir de las aceleraciones en el punto emisor se obtiene la curva SRS.

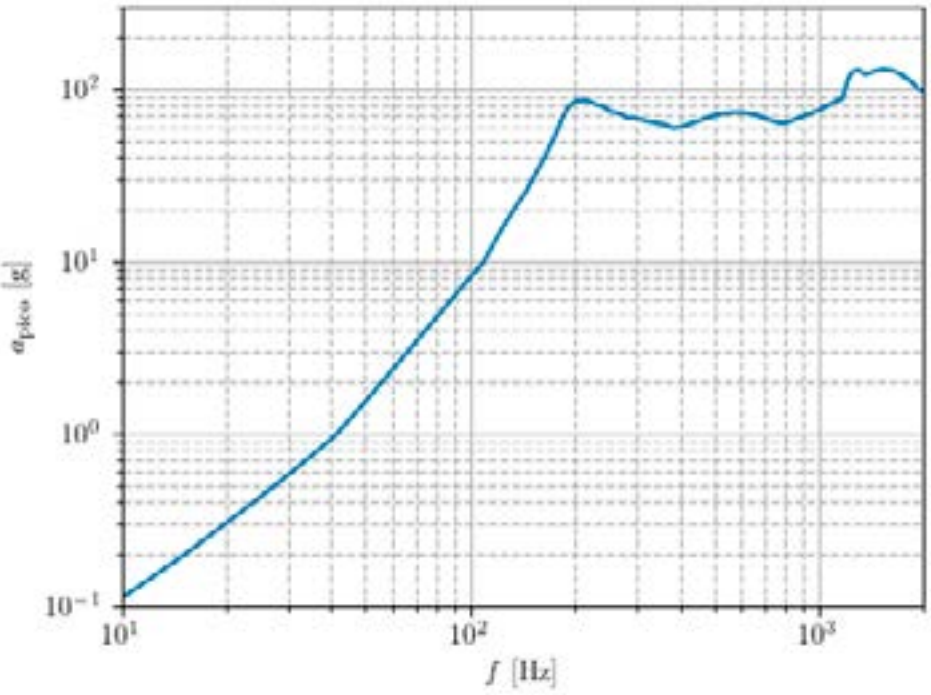


Figura 4. Curva SRS de estructura simple

A partir del espectrograma generado por STFT, se obtienen las frecuencias naturales de la estructura. En este caso solo se observa que dos frecuencias naturales fueron excitadas por el impacto una de 200 Hz y otra de 1241 Hz

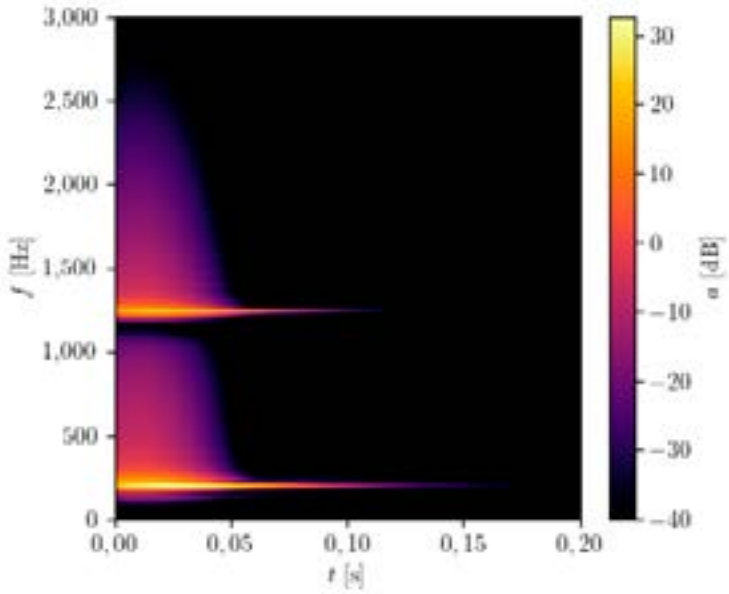


Figura 5. Espectrograma de estructura simple

Del espectrograma también se obtienen los coeficientes de amortiguamiento de ambos modos,

En primer lugar, se realiza un análisis de frecuencias naturales para comparar con los resultados experimentales en el rango de frecuencias de excitación (0-3000 Hz). Lor. Con el objetivo de poder aplicar este amortiguamiento en simulaciones dinámicas, se obtienen los coeficientes de Raleigh equivalentes.

La estructura se modela con elementos tipo “shell”, utilizándose dos alternativas de cálculo dinámico, SMT y el método implícito (no se toma el caso explicito ya que, debido a restricciones en su implementación, no es posible ajustar los amortiguamientos, resultando en errores considerables). Aplicando la fuerza medida experimentalmente. Los resultados se comparan con las aceleraciones máximas obtenidas mediante el método de espectro de respuesta y las curvas SRS.

Tabla 2. Comparación de métodos para la estructura simple.

	Emisor		Receptor	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Experimental	33,6	-60	37,7	-33,3
SMT	33,8	-58,9	37,1	-34
Implícito	39,5	-55,4	39	-34,9
SRS	±112,2		±124,5	

En la Tabla 2 se puede observar que el método SRS (por método de espectro de respuesta) es muy conservativo y no muestra decaimiento del shock al viajar por la estructura, por lo que, si bien es un método sencillo, no otorga mucha información útil para el diseño, en el caso del método SMT e Implícito, los resultados son muy similares a los experimentales, debido a que el método SMT obtiene buenos resultados y es de bajo costo, es el candidato utilizado para evaluar la estructura compleja.

ESTRUCTURA COMPLEJA

Del ensayo se obtienen las siguientes fuerzas aplicadas y aceleraciones para cada configuración.

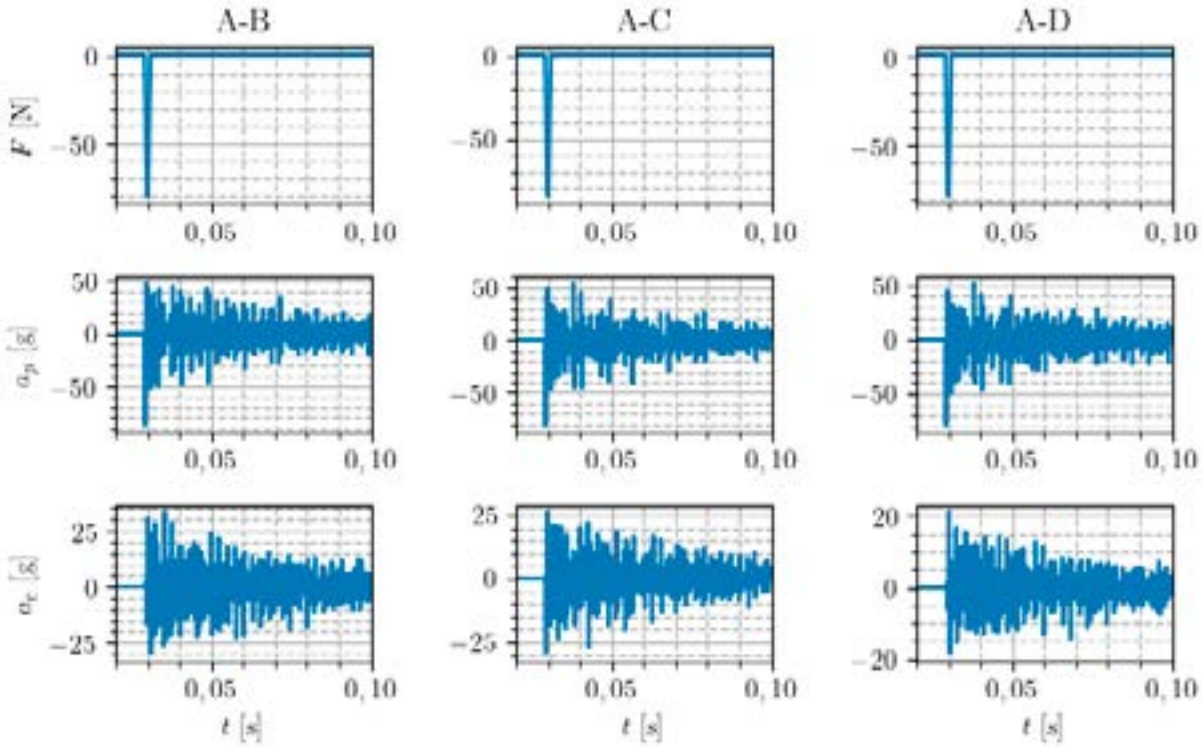


Figura 6. Mediciones en la estructura compleja

A partir de las aceleraciones en el punto emisor se obtiene la curva SRS.

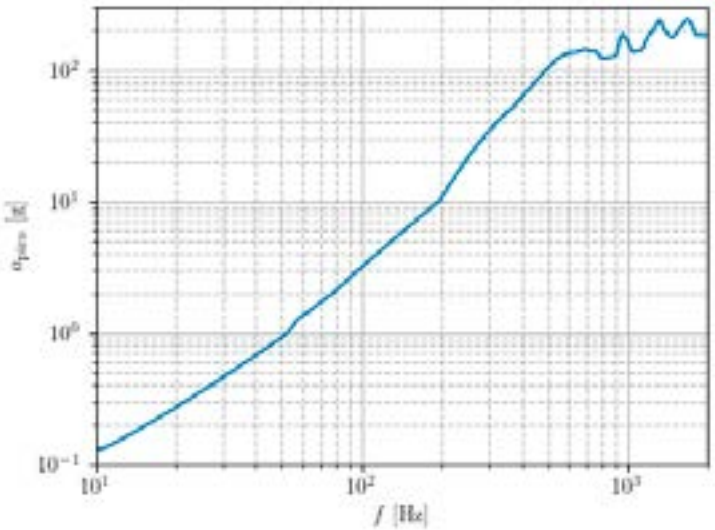


Figura 7. Curva SRS de estructura compleja

A partir del espectrograma generado por STFT, se obtienen las frecuencias naturales de la estructura, la estimación de la deformada y el amortiguamiento para las frecuencias de interés.

La estructura es modelada como diferentes partes unidas, todas modeladas con elementos “shell”, si bien la estructura podría considerarse de paredes gruesas, especialmente cerca de las uniones, y seria mejor representada con elementos sólidos, el costo computacional extra seria demasiado grande para el objetivo de utilizar métodos

simplificados de cálculo. Por otro lado, las diferentes configuraciones de acelerómetros se calculan por separado, debido a que su peso afecta los resultados.

En este caso, por la complejidad de la estructura, las uniones abulonadas son modeladas como contactos soldados, diferenciando las zonas cercanas a los tornillos de las zonas de contacto alejadas de los mismos, para ambas uniones se aplica un factor de rigidez tangencial y normal, permitiendo el ajuste del comportamiento de la junta. En la base donde la estructura se encuentra fijada, apoyada sobre arandelas, se aplica una fijación elástica de rigidez variable, los coeficientes de las uniones son ajustados para aproximar los modos hallados experimentalmente. Luego, se ajusta la amortiguación normal y tangencial de cada junta para ajustar el amortiguamiento por frecuencia natural.

A causa del modelado como shell algunos modos (especialmente modos de corte) no coinciden con los resultados experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la estructura compleja se obtuvieron resultados aceptables para un método simplificado, si bien la respuesta no es la misma que la experimental, su comportamiento es muy similar, obteniéndose buenas aproximaciones de los picos de aceleración tanto para el punto emisor como para el punto receptor, incluyendo el decaimiento de la amplitud.

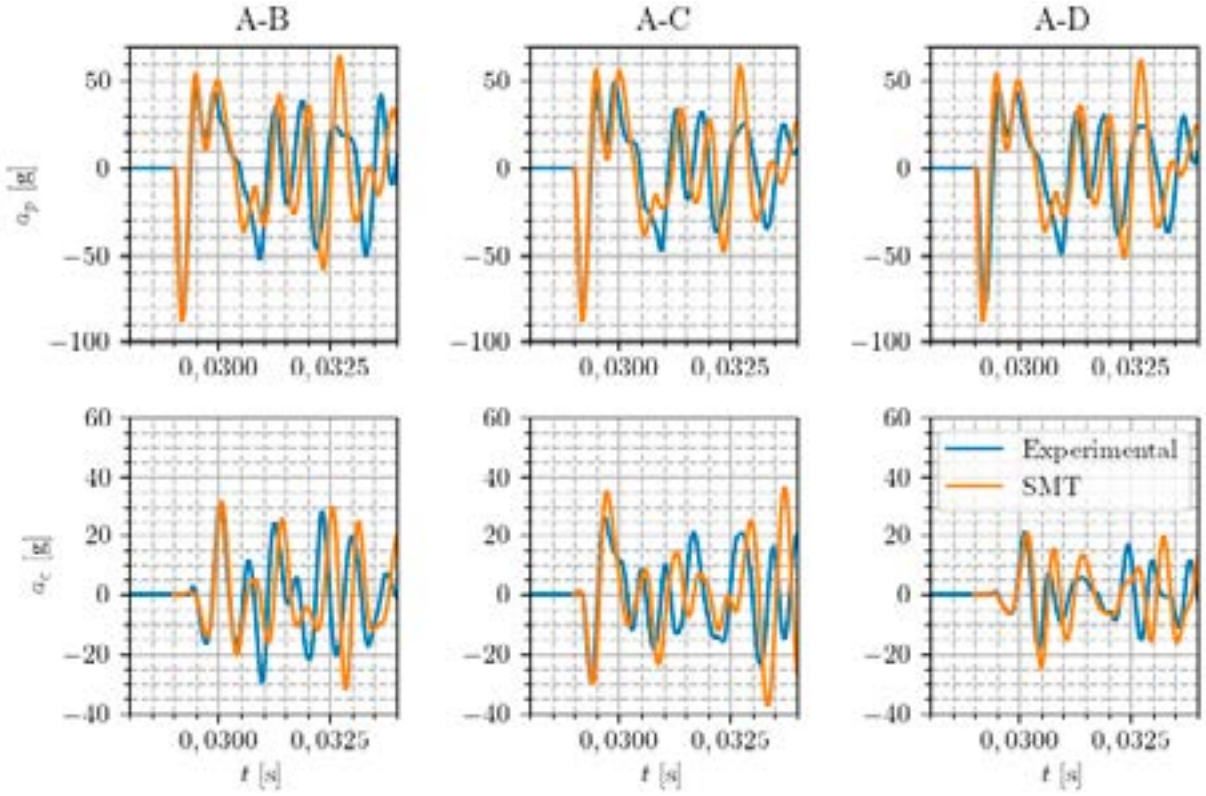


Figura 8. Comparación de resultados experimentales y calculados para las diferentes configuraciones

CONCLUSIONES

Se mostró que el método SRS resulta excesivamente conservativo y no aporta información del decaimiento de la señal para un diseño optimizado.

El método de superposición modal transitorio resulta en una buena aproximación a los resultados experimentales, incluso para la estructura compleja luego de ajustar el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

[1]. An introduction to the shock response spectrum, Tom Irvine, May 2012.
[2]. ECSS-E-HB-32-25A Mechanical shock design and verification handbook. European Cooperation for space standardization. 2015.

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD PARA LA CALIBRACIÓN DE ANEMÓMETROS EN TÚNEL DE VIENTO

Echapresto Garay, Iban[a]; Saavedra, Josefina[a]; Marañón Di Leo, Julio[a,b] y Delnero, Juan Sebastián[a,b]

[a]*Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia – Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET-LaCLyFA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina. Iban.echapresto@ing.unlp.edu.ar*

[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Avenida Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.*

Introducción

Los anemómetros tienen aplicaciones diversas tanto en la industria como en la investigación, desde procesos farmacológicos hasta sistemas de alarmas de viento en la operación de grúas en los puertos, sin olvidar su uso tradicional en mediciones meteorológicas. Todas estas aplicaciones se cimentan en un punto en común, asegurar la calidad de las mediciones.

Por este motivo, es fundamental la calibración periódica de los anemómetros teniendo en cuenta las características de su utilización, es decir, se debe planificar la calibración periódica en los valores de velocidad o en el rango de velocidades de mayor frecuencia de uso del instrumento. Esta acción corresponde a los operadores de los anemómetros, pero desde la UIDET-LaCLyFA se brinda asesoramiento al respecto.

Por otro lado, la propia calibración es un procedimiento que requiere la aplicación de un sistema de gestión de calidad, de manera de asegurar la correcta realización, la trazabilidad, la utilización de normas internacionales para estandarizar operaciones, la comparación entre laboratorios, en resumen, la calidad de las mediciones.

La norma IRAM-ISO/IEC 17025 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración” es el primer paso en el camino de cumplir los objetivos planteados previamente. En ella se establecen los parámetros básicos que un laboratorio debe cumplir para asegurar la calidad de ensayos o calibraciones.

El siguiente paso corresponde a verificar cuáles son los requisitos particulares de las calibraciones de anemómetros en túnel de viento. Esto resulta más complejo, ya que existen normas distintas para calibraciones de distintos tipos de anemómetros. Por ejemplo, para anemómetros de copa existe la norma IEC 61400-12-1:2017 Anexo F, como también la versión de MEASNET. Para anemómetros ultrasónicos la norma ISO 16622:2002, para anemómetros rotativos la ISO 17713:2007, finalmente, para tubos Pitot y anemómetros técnicos existen las guías 24 y 25 de EURAMET.

En este trabajo se plantea la implementación de un sistema de gestión de calidad para la calibración de todo tipo de anemómetros en el túnel de viento TV1 de la UIDET-LaCLyFA, en el rango de 0 a 18 m/s.

Parte experimental

Los requisitos generales, vigentes en la actualidad, que debe cumplir un laboratorio de calibración se encuentran en la norma IRAM – ISO/IEC 17025:2017. Esta se divide en 5 partes, requisitos generales, relativos a la estructura, relativos a los recursos, del proceso y

del sistema de gestión. Si bien el sistema de gestión de calidad abarca todas estas partes, para este trabajo nos centraremos en los requisitos relativos a los recursos y los requisitos del proceso.

Con respecto a los recursos, en la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia - Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET-LaCLyFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI - UNLP) se cuenta con un el túnel de viento denominado TV1, de circuito cerrado, con una sección de prueba cerrada de sección rectangular de 1,4 m de ancho por 1 m de alto. El flujo se logra mediante una hélice impulsada por un motor eléctrico de 50 HP, el motor se encuentra afuera del túnel, por lo que no aporta calor al flujo. La velocidad máxima es de 20 m/s.

Para determinar la uniformidad del flujo se realizan caracterizaciones del perfil de velocidades en la sección de prueba y en secciones aguas arriba y aguas abajo. Se miden las velocidades longitudinales, transversales y verticales con un equipo de anemometría de hilo caliente en una grilla ubicada en el centro de la sección cumpliendo los requisitos geométricos de las normas que establecen las características del flujo. Dichas normas especifican que el flujo no debe variar en más de un 1% en la zona de calibración. Así mismo, establecen que la intensidad de turbulencia debe ser menor al 2%.

Otro requisito perteneciente a los recursos es la trazabilidad metrológica, esto se logra calibrando periódicamente nuestro instrumento patrón en el IPT de Brasil. Esta calibración no solo permite establecer la trazabilidad al sistema internacional sino que también permite establecer la deriva del instrumento patrón y establecer si es apropiado el periodo de calibración.

Por otro lado, en las normas que determinan los procedimientos de calibración o ensayo de desempeño de anemómetros se encuentra un apartado referido al túnel de viento, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta es el bloqueo, es decir, el área frontal que ocupa el anemómetro a calibrar, el instrumento patrón y los soportes correspondientes debe ser como máximo un 5% del área total del túnel. En el TV1 dicha área frontal puede ser hasta 700 cm^2, lo que permite la calibración de gran variedad de anemómetros. En la Figura 1 se muestra el interior del túnel de viento con un anemómetro de copas y el instrumento patrón.

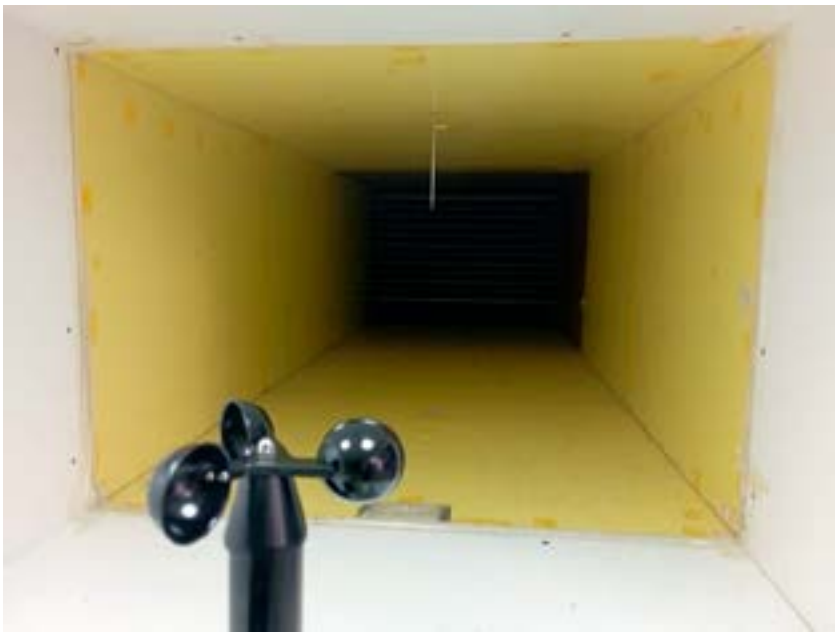


Figura 1. Anemómetro de copas en el interior del TV1.

Entre los requisitos del proceso se encuentran la selección, verificación y validación de métodos. Para el caso de calibraciones de anemómetros no existe un procedimiento normalizado que abarque todos los tipos de anemómetros, existen procedimientos para algunos tipos de anemómetros. Nuestro procedimiento de calibración no sólo se basa en el procedimiento de calibración de anemómetros de copa sino también en las guías de calibración de tubos Pitot y termoanemómetros, como también en las normas de ensayo de anemómetros ultrasónicos y rotativos. Por este motivo, se debe validar el procedimiento de calibración de anemómetros. Dicha validación se realiza con calibraciones triangulares, es decir, se calibran dos instrumentos con el instrumento patrón y luego esos dos instrumentos entre sí. También se realizan comparaciones interlaboratorios.

Resultados y discusión

El túnel de viento fue caracterizado en una grilla centrada en la sección de prueba, a una velocidad de 5 m/s y 10 m/s. Se obtuvieron las velocidades longitudinales, transversales y verticales, los valores medios de las mismas se muestran en la Figura 2 para el caso de 5 m/s.

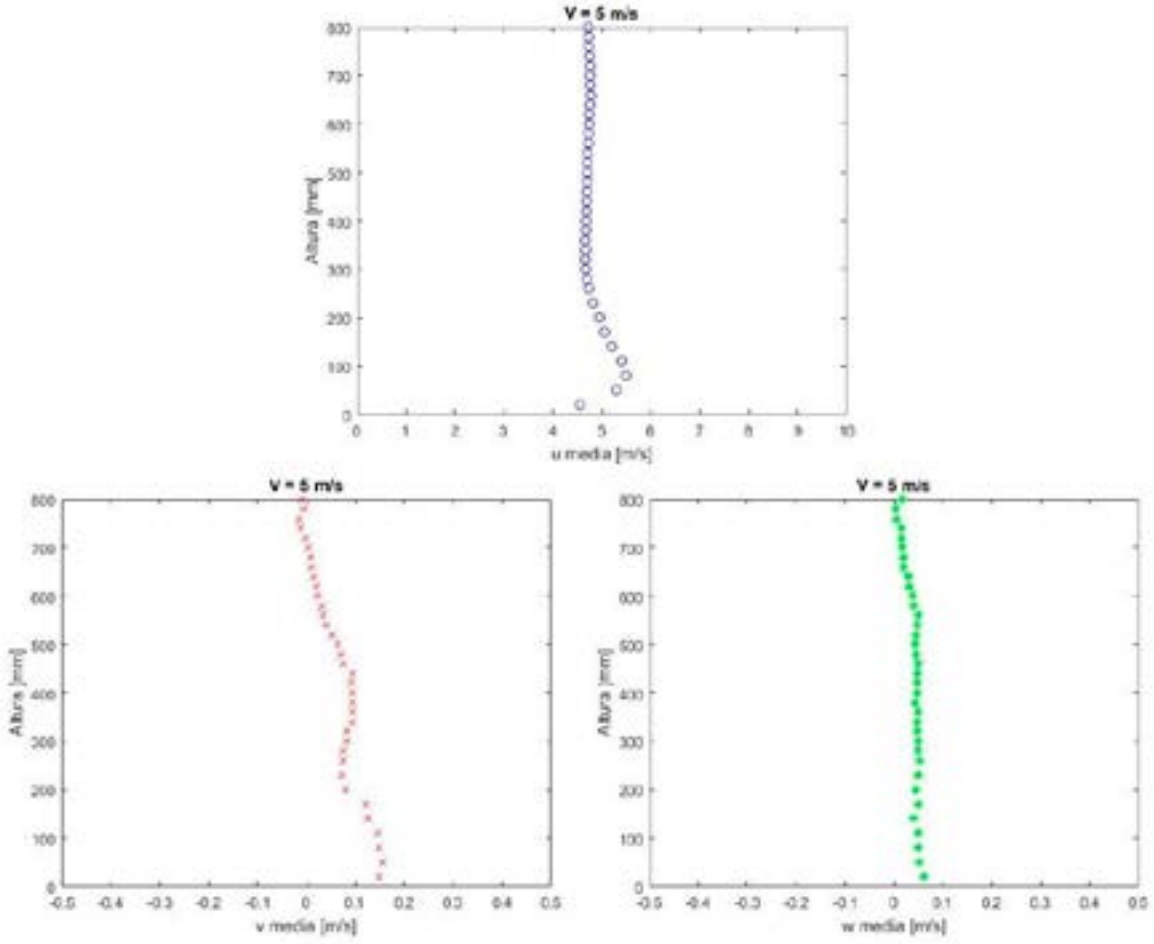


Figura 2. Perfiles de velocidad longitudinal, transversal y vertical en la posición central de la sección de prueba.

Con estas mediciones se calculó la intensidad de turbulencia, la misma se muestra en la Figura 3 donde se observa que desde 300 mm hacia arriba se tiene una intensidad de turbulencia menor al 2%. Esto determina que el túnel tiene un flujo uniforme, acorde con la normativa vigente.

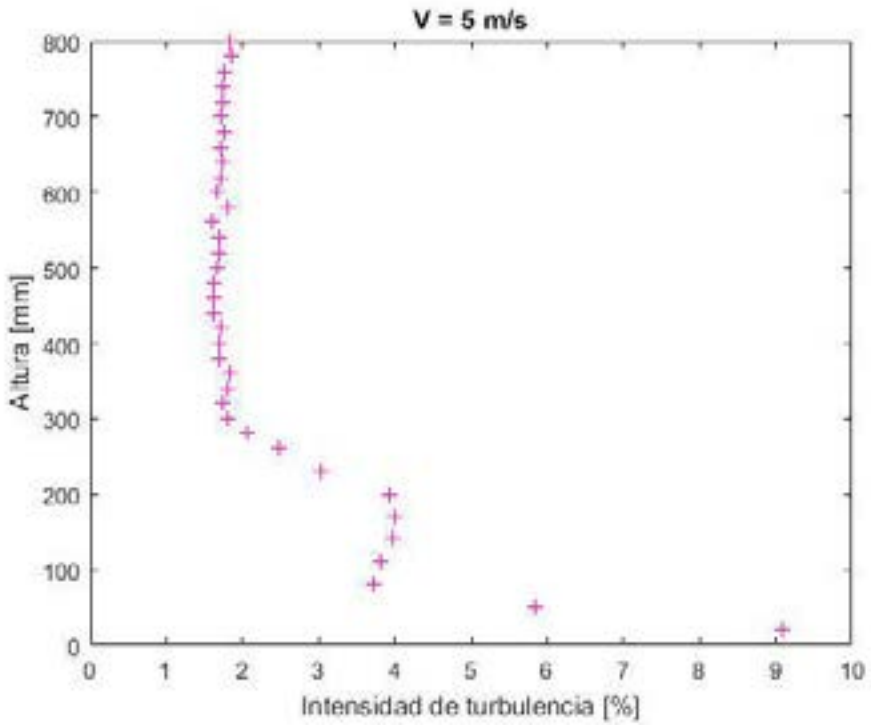


Figura 3. Intensidad de turbulencia longitudinal.

La calibración es una representación del estado actual del instrumento calibrado, por este motivo es el dueño del instrumento quien determina su aceptación y uso o el rechazo y desuso de este. El laboratorio no tiene un criterio de aceptación, pero si establece recomendaciones basadas en las normas y procedimientos de calibración en que se basa nuestro procedimiento de calibración, por ejemplo, se considera una relación lineal entre el anemómetro calibrado y el instrumento patrón si el valor de R^2 es igual o mayor que 0,9995. En la Figura 4 se muestra una curva de calibración de un instrumento perteneciente al laboratorio realizada en 20 puntos, 10 en carrera ascendente y 10 en carrera descendente.

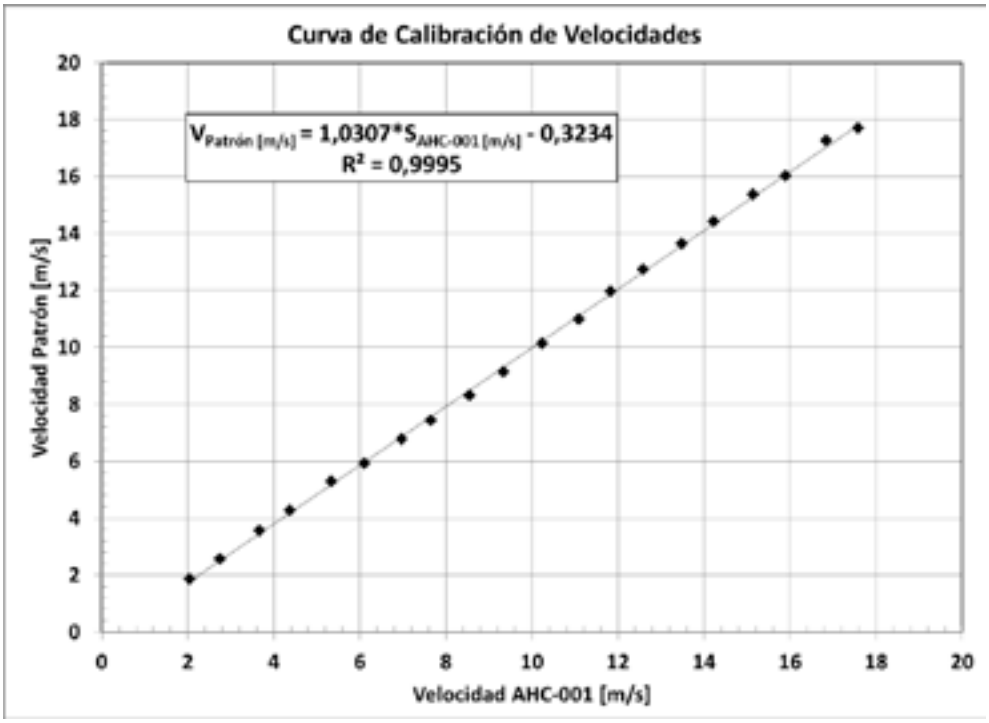


Figura 4. Curva de calibración.

En cuanto a la validación del procedimiento de calibración, la comparación interlaboratorio se realizó con resultados satisfactorios. En la Figura 5 se muestra la curva de calibración del instrumento itinerante. Así mismo se realizaron calibraciones triangulares de tubos pitot con resultados satisfactorios, estableciendo que el procedimiento es válido para todo tipo de anemómetros.

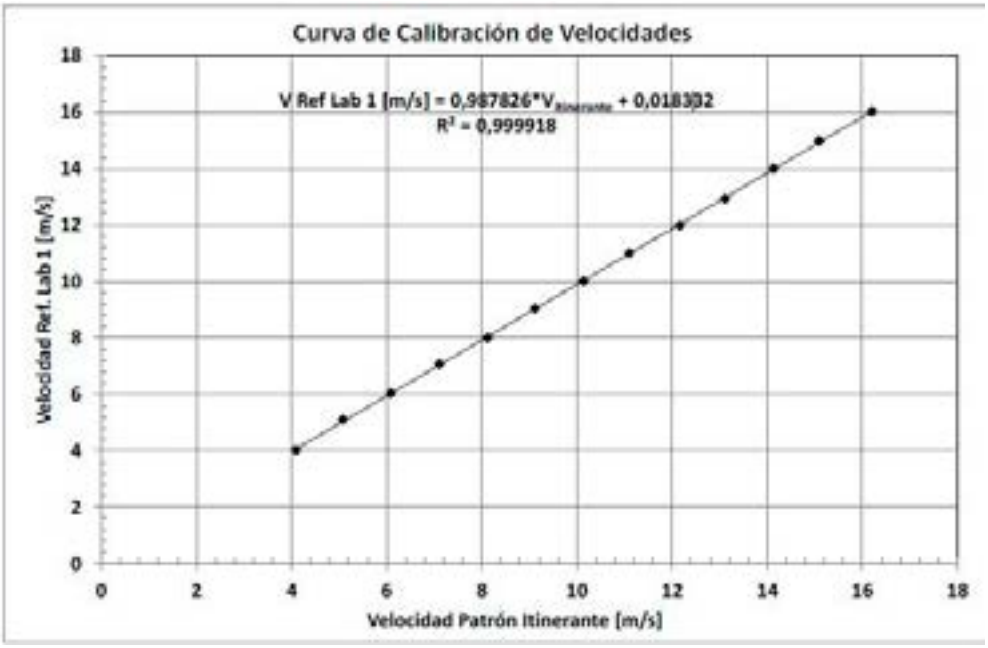


Figura 5. Curva de calibración de la comparación interlaboratorios.

Conclusiones

Como conclusión podemos decir que se establece el cumplimiento de los requisitos de la norma IRAM-ISO/IEC 17025:2017 a partir de los ensayos realizados y las validaciones correspondientes.

La aplicación de un sistema de gestión de calidad para la calibración de anemómetros es compleja y requiere un seguimiento adecuado, pero con el objetivo de asegurar la calidad de las mediciones y realizando la planificación correspondiente, se obtuvieron resultados satisfactorios.

Bibliografía

Norma IRAM-ISO/IEC 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”

Norma IEC 61400-12-1:2022 Anexo F Wind tunnel calibration procedure for anemometers

Measnet Anemometer Calibration Procedure, versión 3, 2020.

Norma ISO 16622:2002 “Meteorology - Sonic anemometers/thermometers - Aceptance test methods for mean wind measurements”

Norma ISO 17713-1:2007 “Meteorology - Wind measurements - Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance”

EURAMET Calibration Guide No. 24, version .3.0, 2021 “Pitot Static Tubes”

EURAMET Calibration Guide No. 25, version .1.0, 2021 “Thermal Anemometers”

U. Boldes, J. Morosi, J. Colman, V. Nadal Mora, “Descripción y caracterización del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería (UNLP)”, 1993, SEDICI.

ANALISIS Y EVALUACION DE RESULTADOS DE IMPLANTES DENTALES SEGÚN NORMA ISO 14801:2016

Curell Federico (1), Oyarzun Larrea Cesar (1), Desirio Joaquín (1)

(1) Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.
carlos.curell@ing.unlp.edu.ar

Palabras claves: Implante dental, ISO 14801:2016

1. Introducción

Un implante dental (Figura 1.-) es un dispositivo médico utilizado para reemplazar piezas dentales perdidas, permitiendo restaurar funciones esenciales como la masticación. Estos dispositivos están compuestos por un cuerpo que se integra al hueso maxilar o mandibular y un pilar que conecta con la prótesis dental. Los materiales empleados en su fabricación suelen ser aleaciones de titanio y materiales cerámicos, seleccionados por su alta resistencia mecánica y biocompatibilidad.
En Argentina, la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT) regula los implantes dentales, asegurando que sean seguros, eficaces y de calidad. Para validar estas características, es necesario realizar ensayos mecánicos que evalúen su desempeño bajo condiciones controladas. Entre los métodos de ensayo internacionalmente reconocidos se encuentra la norma ISO 14801:2016, la cual establece procedimientos para evaluar la resistencia mecánica de los implantes dentales endoóseos mediante ensayos de carga dinámica.
El presente estudio se basa en la recopilación y análisis de resultados de ensayos realizados sobre implantes de 3,5 mm de diámetro, fabricados en titanio por diversas empresas. La base de datos comprende ensayos ejecutados desde el año 2018 hasta la actualidad, permitiendo un análisis comparativo de la resistencia mecánica de estos implantes en función de su carga estática máxima alcanzada y la carga dinámica de ensayo, asegurando una vida infinita de la muestra a 5.000.000 de ciclos sin sufrir roturas ni deformaciones permanentes.

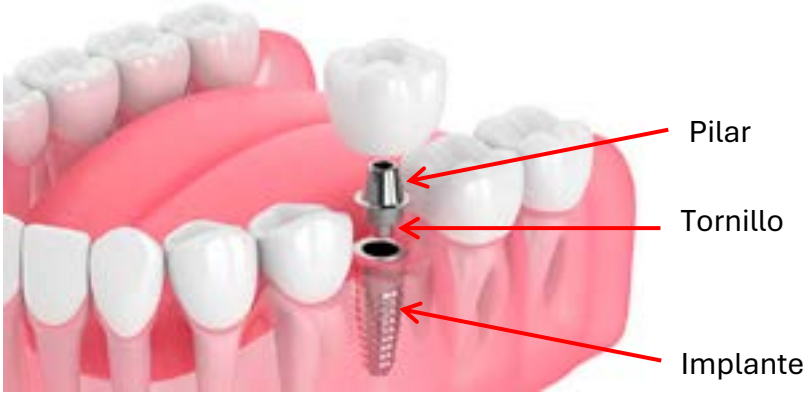
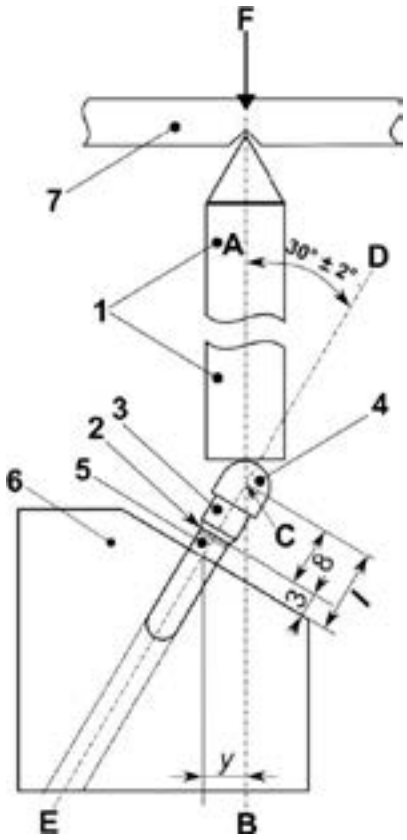


Figura 1.- Partes de un Implante dental

2. Parte Experimental

Montaje de la muestra y aplicación de la carga según ISO 14801
Para los ensayos mecánicos, la muestra de implante dental endoóseo con pilar recto se fija en un dispositivo de anclaje que mantiene su eje longitudinal central inclinado en 30° ± 2° respecto a la dirección de aplicación de la carga de la máquina de ensayo. La fuerza de carga es aplicada mediante un elemento de contacto hemisférico en el extremo libre del pilar,

asegurando que la transferencia de carga se realice sin restricciones laterales. La muestra se sujeta en un dispositivo de anclaje fijo a una distancia de 3,0 mm ± 0,5 mm apicalmente desde el nivel nominal del hueso. El centro de carga se sitúa entre la intersección del eje longitudinal central del extremo libre del pilar con el plano perpendicular al eje longitudinal del implante y situado a 11 mm ± 0,5 mm (l) del nivel de apoyo del implante. Figura 2.-



Leyenda
1 Dispositivo de carga
2 Nivel nominal del hueso
3 Pilar del implante
4 Elemento de carga hemisférico
5 Cuerpo del implante dental
6 Soporte de la muestra
7 Aplicación de la fuerza
AB Eje de la carga
DE Eje longitudinal del implante
y Brazo del momento y=l*sen (30)

Figura 2.- Esquema de la instalación de ensayo para sistemas con pilares del implante no angulados

Prueba estática

Se acondicionaron las muestras de ensayo, en temperatura controlada: 20 ºC ± 10 ºC.
Se procedió a realizar sobre tres (3) muestras, un ensayo estático para determinar la carga máxima alcanzada promedio del implante dental. El mismo se montó en la parte de anclaje al hueso en un dispositivo de anclaje fijo. Todo este dispositivo se montó sobre la máquina de ensayos INSTRON (Figura 3.-).
El ensayo se realizó a una velocidad de aplicación de carga constante. La prueba se realizó en seco a temperatura ambiente y se registró la curva de esfuerzo-deformación y la carga máxima alcanzada por la muestra.

Prueba dinámica

Posteriormente, se montó una nueva muestra del mismo modelo al ensayado en el ítem estático sobre la máquina de ensayos dinámicos y se procedió a obtener la carga a la cual la misma alcanza la vida infinita
En la máquina de ensayos, se configuraron la frecuencia de ensayo, la cantidad de ciclos requeridos (5.000.000 ciclos) y los valores de carga. La carga máxima dinámica se definió como un porcentaje del valor promedio de las cargas máximas adquiridas en el ensayo estático y la carga mínima como el 10% de la carga máxima dinámica.
Se aplicó la carga dinámica hasta que ocurriera alguno de los siguientes eventos:

- Deformación permanente o rotura de la muestra.
- Se alcanzara el número de ciclos requerido sin rotura o deformación.

- Se reemplazó la muestra y se repitió el proceso hasta obtener resultados de al menos dos muestras en dicho nivel de carga.

Se llevaron a cabo ensayos en cuatro niveles de carga, ajustando la carga en cada nivel según correspondiera, hasta que al menos tres muestras alcanzaran el número de ciclos requerido sin rotura o deformación permanente.

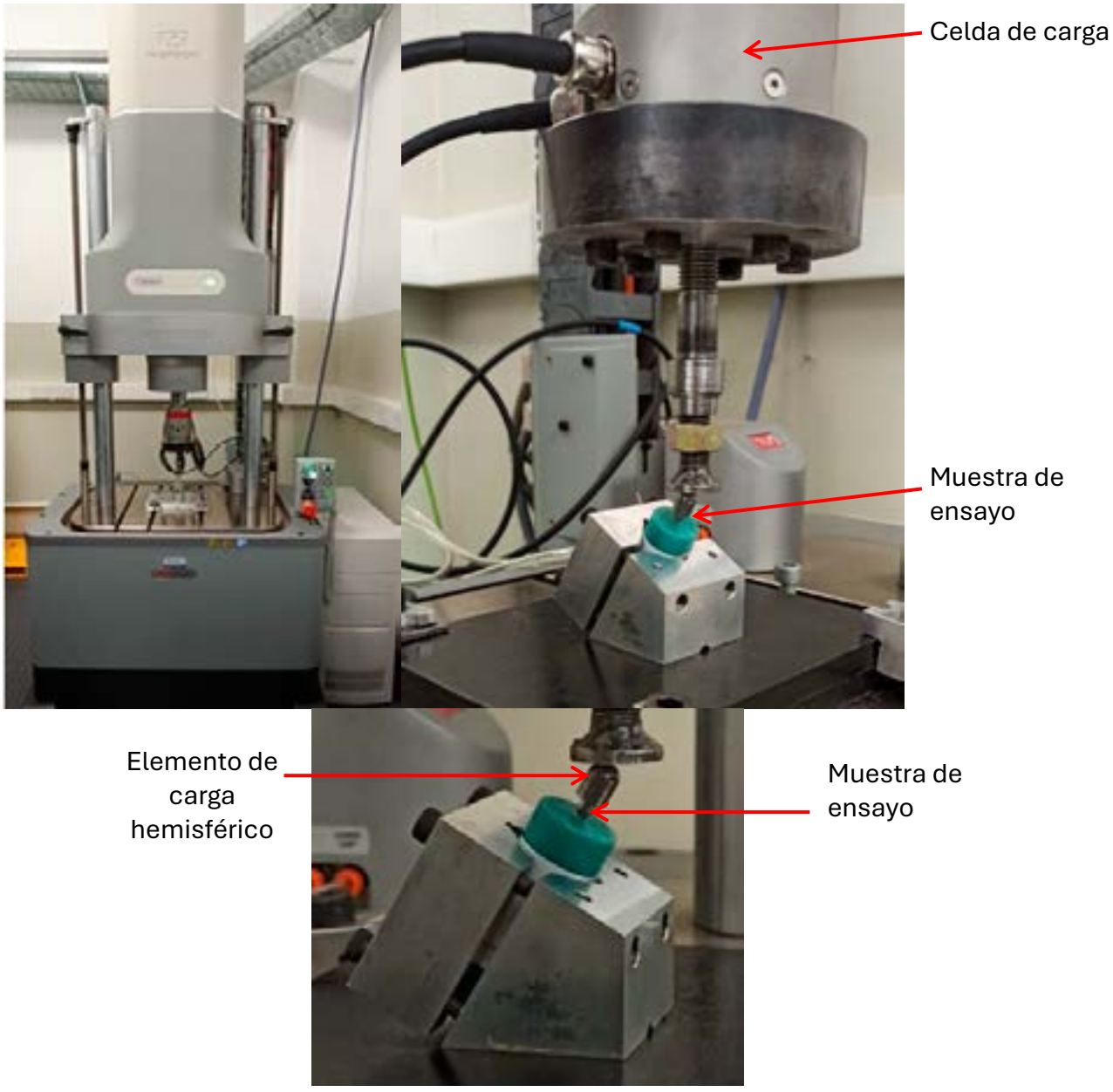


Figura 3.- Máquina de ensayos estáticos y dinámicos INSTRON ELECTROPULS E10000

3. Resultados y Discusión

Se observó que la norma ISO 14801:2016 proporciona un método de ensayo confiable, pero no establece valores de referencia para evaluar

Los resultados analizados provienen de ensayos realizados en implantes de titanio de 3,5 mm de diámetro, evaluados desde 2018 hasta la actualidad. La comparación entre distintas empresas permite establecer tendencias y evaluar el desempeño mecánico de los implantes en función de su característica geométrica, en este caso se propone el análisis para implantes de 3,5 mm ya que es el más solicitado para ensayo. Este enfoque contribuye a generar una

base de datos confiable para futuras optimizaciones en el diseño de implantes dentales, garantizando que las condiciones de carga evaluadas aseguren una vida útil prolongada, basada en la carga dinámica definida para 5.000.000 de ciclos.
Para visualizar la dispersión y distribución de las cargas evaluadas, se presentan a continuación los gráficos de distribución de carga máxima alcanzada y carga a vida infinita a 5.000.000 de ciclos, así como diagramas de caja y bigotes que permiten analizar la variabilidad y la presencia de valores atípicos en los ensayos realizados. (Gráfico 1.- y Gráfico 2.-)

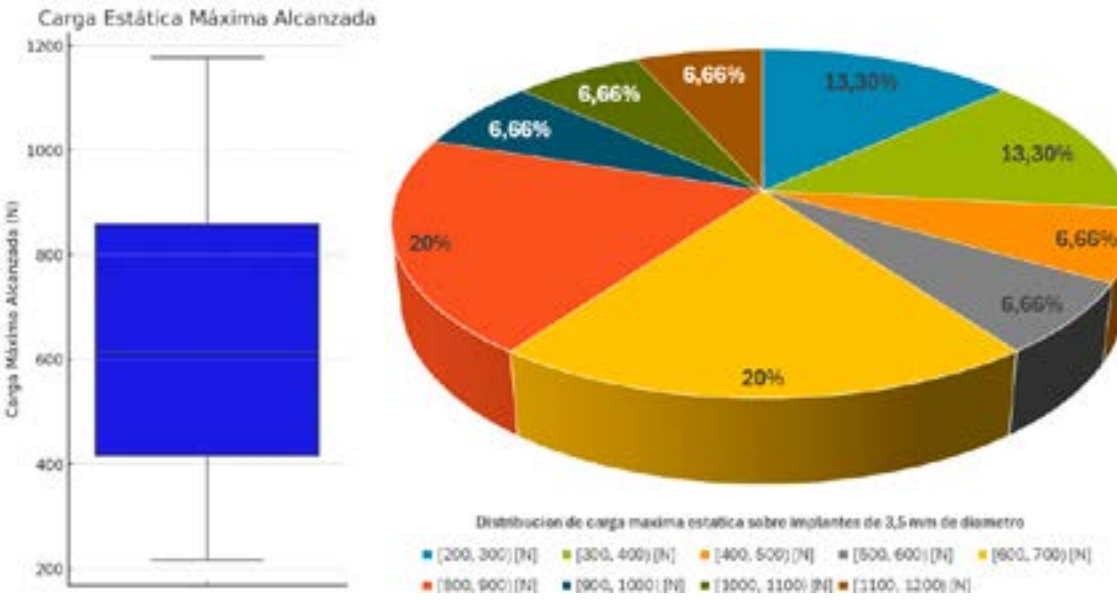


Gráfico 1.- Ensayo estático: Diagrama de caja y bigotes y distribución de cargas máximas alcanzadas sobre implantes de titanio de 3,5 mm

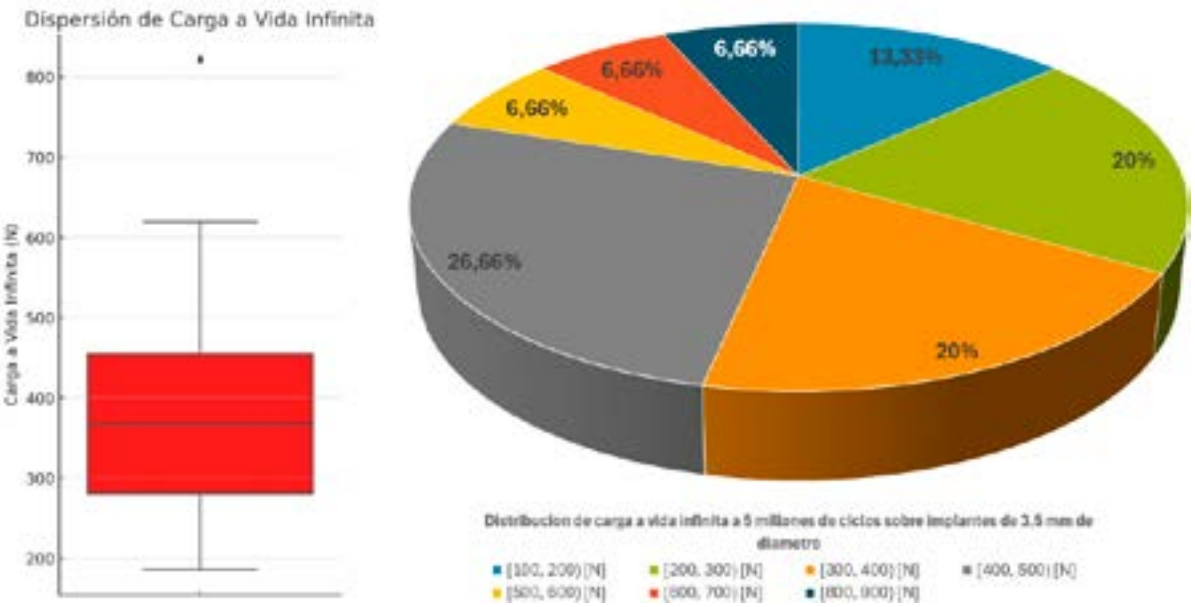


Gráfico 2.- Ensayo dinámico: Diagrama de caja y bigotes y distribución de cargas a vida infinita sobre implantes de titanio de 3,5 mm

Los resultados muestran una relación de 0,7 entre la carga máxima estática alcanzada y la carga a vida infinita en régimen dinámico, lo que indica una relación significativa entre ambas variables.
Se amplio el estudio de la relación entre la carga máxima estática y la carga a vida infinita a todas las geometrías ensayadas del 2018 a la actualidad y se confirmó que la carga dinámica tiende a representar un porcentaje constante de la carga estática (70%), lo que sugiere un comportamiento estructural predecible de los implantes.

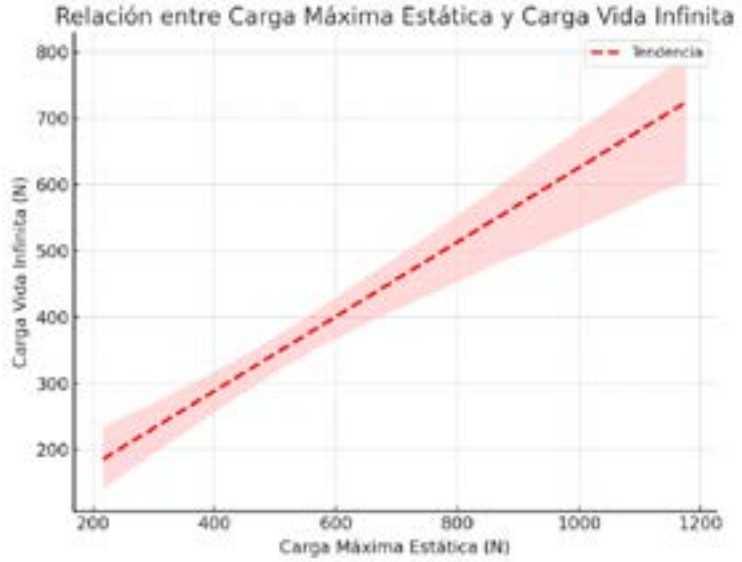


Gráfico 3.- Dispersión de resultados entre el valor obtenido en el ensayo estático y dinámico de todas las muestras ensayadas

El análisis del diámetro del tornillo responsable de la unión entre el pilar y el implante mostró una correlación negativa con la carga máxima estática alanzada (Coeficiente de Pearson -0.64), lo que indica que, en general, un mayor diámetro del tornillo reduce la capacidad de carga estática del implante. Esto se debe a que un tornillo más grande ocupa más volumen dentro del implante, reduciendo la cantidad de material estructural disponible para soportar la carga.

4. Conclusiones

El estudio realizado resalta la importancia de la norma ISO 14801:2016 en la evaluación de implantes dentales, pero también subraya la necesidad de desarrollar una base de datos estructurada para comparar resultados de diferentes ensayos. La recopilación y análisis de datos históricos permitirá mejorar la interpretación de los ensayos mecánicos y definir criterios más precisos para evaluar la resistencia estructural de los implantes dentales.
Se concluye que existe una fuerte correlación (Coeficiente de evaluación de Pearson de 0,94) entre la carga máxima estática alcanzada y la carga a vida infinita en régimen dinámico.
Los implantes con mayor carga estática tienden a tener una mejor resistencia en ensayos dinámicos.
Un mayor diámetro de tornillo tiende a reducir la carga máxima estática alcanzada del implante.
Es necesario continuar con la recopilación de datos y realizar estudios adicionales para optimizar el diseño y la resistencia de los implantes dentales.
Estos hallazgos contribuyen al diseño y selección de implantes con mejor desempeño mecánico, asegurando una mayor durabilidad y confiabilidad en su uso clínico.

5. Bibliografía

- Ensayo de carga dinámica para implantes dentales endooseos (ISO 14801:2016)

DISEÑO DE IMPLEMENTACION, ESTUDIO ESTADISTICO Y APLICACIÓN DE IRAM/AITA 10260 EN PARAGOLPES

Oyarzun Larrea César, Curell, Federico, Desirio, Joaquín

Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial,
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.
cesaroyarzunlarrea@gmail.com

El presente trabajo se divide en dos partes, primero de aborda el diseño de la implementación y luego continua con el estudio estadístico de los resultados de la ejecución de los ensayos.

Diseño y fabricación de la implementación.

Introducción: A partir del estudio de la normativa IRAM/AITA 10260 que regula los dispositivos de protección trasera o paragolpes surge la necesidad de diseño, construcción e implementación de un dispositivo de ensayo capaz de satisfacer las exigencias para la homologación de paragolpes traseros de protección según IRAM/AITA 10260.
Los dispositivos en cuestión son elementos de protección ubicados en la parte posterior de los vehículos de categorías N2, N3, O3 y O4 cuya masa total máxima del vehículo sea mayor que 5000 kg, la función es amortiguar las colisiones y proteger a los ocupantes del vehículo que impacte sobre el paragolpes.
Si bien la norma de referencia expresa que el ensayo se puede realizar sobre el vehículo, también es posible realizar el ensayo en un banco o bastidor que simule las condiciones reales de fijación a dicho vehículo y que sea capaz de soportar las cargas aplicadas en dicha pieza que es considerada como autoparte de seguridad, este dispositivo (paragolpes) es un elemento de protección destinado a reducir los daños causados a otros vehículos que colisionan con la parte trasera del vehículo. Este dispositivo está conformado por una faja (elemento longitudinal capaz de absorber la energía al momento de una colisión), una bajada fija y una móvil. La bajada fija sirve de anclaje al chasis o elemento infinitamente rígido del vehículo instalado y la móvil se fija en la faja, pero debe permitir movimiento relativo respecto a la bajada fija. Esto se debe a que la norma IRAM 10260 especifica que el dispositivo debe ser rebatible hacia la parte trasera del vehículo, para evitar su interferencia con objetos tales como cunetas y reductores de velocidad y a su vez debe presentar medios apropiados de bloqueo en la posición de servicio que se va a utilizar e impidiendo cualquier variación no intencional de la posición, solamente en la posición opuesta al funcionamiento.
Desarrollo: La primera etapa para el desarrollo del banco de ensayos es establecer la situación más crítica de carga en la cual se va a utilizar el dispositivo a diseñar. La deformación permanente máxima debe ser menor o igual a 200mm, en cualquiera de los puntos de aplicación de la carga P1, P2 O P3 (Figura 1) luego del ensayo según norma IRAM 10260

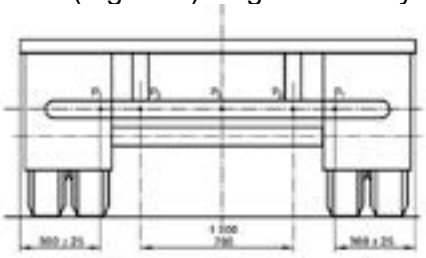


Figura 1.-Puntos de aplicación de carga.

La norma de referencia establece dos categorías de vehículos a los cuales se le aplican diferentes cargas de ensayo en función de los niveles de áreas de deformación y absorción de energía que poseen, en el caso más crítico la masa total máxima del vehículo es superior a 24000 kg. La carga a aplicar son 10000 daN en P1 y P3 y 15000 daN en P2.
La segunda etapa es establecer la ubicación de los impactadores en el banco de ensayo para la aplicación de las cargas P1, P2 y P3 sobre la muestra de ensayo, todos los puntos se sitúan sobre una misma recta con una separación entre ellos dependiendo el modelo a ensayar. Luego de establecer las condiciones críticas sobre un mismo plano para que la ubicación del impactador de carga satisfaga todos los modelos particulares de cada solicitante de ensayo del sistema de protección trasero. Se establece que la separación de los puntos P1 no será mayor a los 2 m y dentro de este rango se encontraran los puntos P2 y P3 en función al decreto 32/2018 se sabe que la muestra de ensayo no superará los 2,6 m de largo.
Una vez establecida la ubicación de los actuadores sobre un mismo plano, se debe establecer el rango de posicionamiento dependiendo de la distancia entre el plano de la faja a la bajada fija anclada al chasis o elemento de sujeción del dispositivo de protección trasero. Cada fabricante de dispositivo trasero de protección tiene un diseño propio, por lo que se hace imposible establecer un rango de este plano, por lo que se decide que este regule sea lo más amplio posible para abarcar la mayor cantidad de espectro de diseños, pero también que tenga capacidad de ampliación en el caso de ser necesario.
Finalizado la etapa de diseño se busca una solución en la cual satisfaga todos los requerimientos establecidos, la misma se realizó en función de los equipos que poseía el laboratorio UIDET GEMA y el Centro Tecnológico Aeroespacial (Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata), tratando de minimizar el costo de implementación. Para satisfacer el estado de cargas se decide utilizar un actuador hidráulico capaz de desarrollar la carga de ensayo critica (15000 daN), luego para cumplir con la ubicación de la carga en los puntos de aplicación se decide colocar el actuador hidráulico sobre una guía que permita movimiento relativo longitudinal, cubriendo todos los puntos de ensayo independientemente del modelo particular de cada fabricante. Se realizo en el diseño en CAD como se puede ver en la Figura 2.
Experimentación o prueba del dispositivo: En base al diseño en CAD y los requerimientos prescriptos en la etapa de diseño se procedió a la construcción del banco de ensayos cumpliendo la norma de referencia, una vez concluida la fabricación del dispositivo de ensayo, se realizaron una serie de pruebas de verificación para evaluar el correcto funcionamiento, las cuales consistieron en aplicar la carga máxima del actuador sobre un soporte rígido. Esta misma prueba se repitió en distintos lugares de la guía, obteniendo una correcta respuesta del sistema soportando la carga aplicada. El modelo final se puede ver en la Figura 3 en la cual se encuentra una muestra de ensayo.

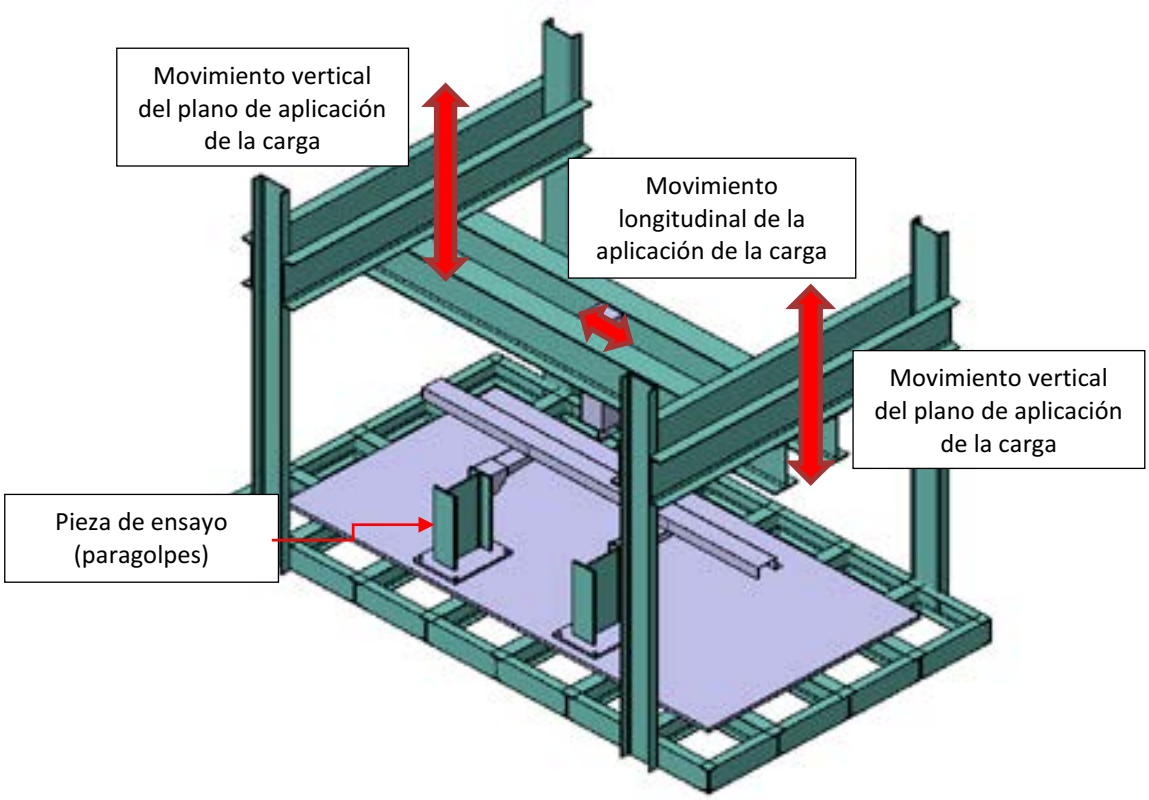


Figura 2.-Vistas isométricas de la implementación en CAD.



Figura 3.- Implementación finalizada con muestra de ensayo.

Conclusión: El dispositivo diseñado y construido cumple con lo propuesto satisfactoriamente, permitiendo la realización del ensayo estructural según la norma IRAM/AITA 10260, realizando ensayos actualmente desde el 2018 aproximadamente hasta la fecha 2025.

Estudio estadístico de los resultados.

Introducción: La información recopilada durante los ensayos de resistencia de dispositivo trasero de protección (paragolpes) a partir de la aplicación de la Normativa IRAM/AITA 10260, se establece una estadística comparativa histórica en función de los resultados obtenidos del año 2018 al 2023, aplicado a los vehículos de las categorías N2, N3, O3 y O4 cuya masa total sea mayor a 5000 kg.

El protocolo de ensayo sigue los lineamientos descriptos por la Norma IRAM/AITA 10260:2016 con modificación Nº1 2019 y Nº2 2023, la cual en resumen consiste en someter a los dispositivos de protección a un estado de cargas y verificación dimensióneles.

Desarrollo: El análisis minucioso de los resultados de los ensayos de resistencia y absorción de energía en los paragolpes de vehículos categoría O4, realizados entre 2018 y la fecha 2023, permite extraer conclusiones sólidas sobre la eficacia de estos componentes clave en la seguridad vial. La diversidad de resultados entre los fabricantes y modelos subraya la variabilidad inherente en la resistencia y absorción de energía de los paragolpes.

A través de los ensayos, algunos paragolpes lograron cumplir con los requisitos establecidos en primera instancia, mientras que otros requirieron múltiples intentos para alcanzar un resultado satisfactorio. Ver Figura 4

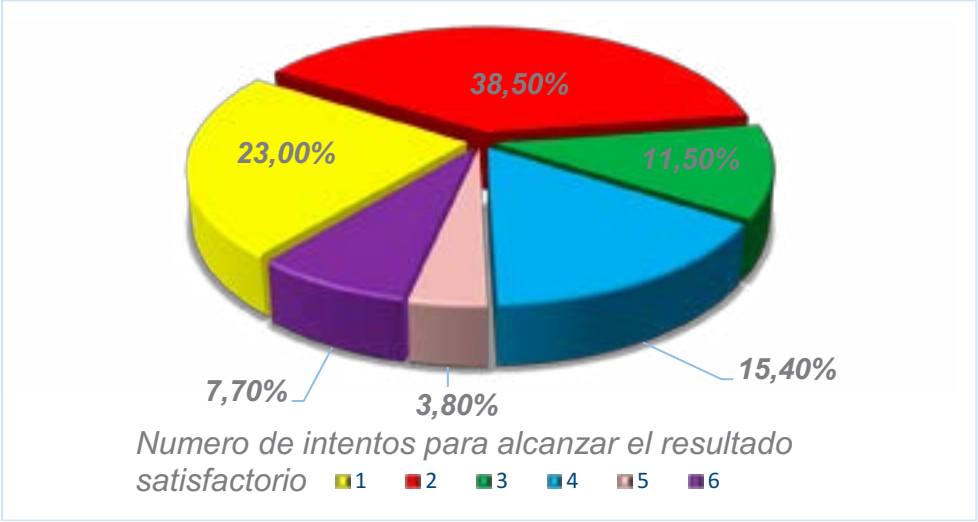


Figura 4. – Distribución histórica de resultados de ensayos en paragolpes desde 2018 a la fecha 2023

Los resultados muestran una tendencia hacia la mejora en el rendimiento a lo largo del tiempo. En la Figura 5 se puede observar que en la actualidad el porcentaje de diseños que no logran pasar satisfactoriamente la prueba disminuyo notablemente

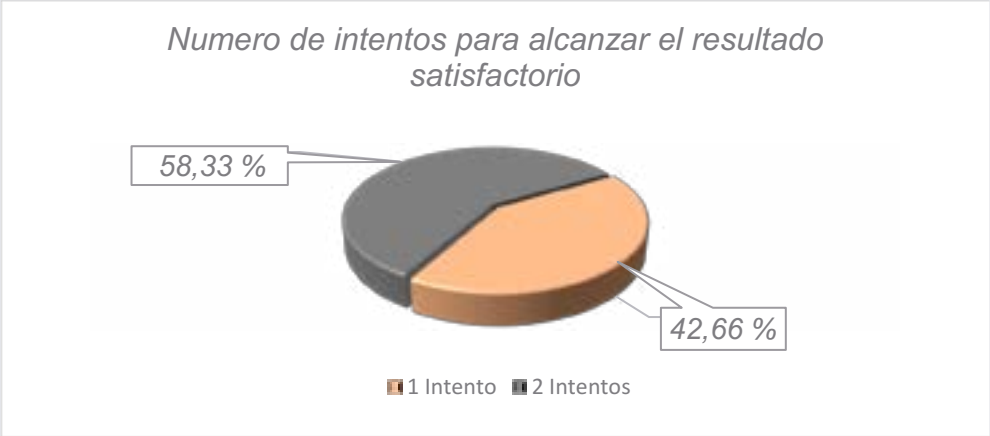


Figura 5. Distribución histórica de resultados de ensayos en paragolpes 2022-2023

Esta evolución sugiere que los fabricantes están adoptando enfoques de diseño y materiales más avanzados como aceros microaleados para aumentar la resistencia y la capacidad de absorción de energía de los paragolpes, buscando alcanzar niveles más altos de seguridad vial.

Tras analizar los resultados de las pruebas de carga y deformación plástica en las diferentes pruebas, se puede observar una tendencia clara en cuanto a las áreas más críticas y las principales causas de las fallas. En primer lugar, se destaca que el punto de aplicación de la carga P1 ha demostrado ser el más vulnerable, presentando el mayor porcentaje de fallas en comparación con los otros puntos de prueba. Esta observación sugiere que la zona cercana a P1 es especialmente susceptible a ceder bajo las condiciones de carga y deformación plástica aplicadas en los ensayos. En cuanto a las causas de las fallas, es evidente que existen factores recurrentes que contribuyen a la inestabilidad de los componentes. La soldadura, como método de unión, se ha identificado como una fuente de problemas en varias empresas, esta técnica es crítica para mantener la integridad de las estructuras, y su falla puede llevar a un compromiso significativo en la resistencia de los materiales. Además, se destacan como otros factores principales en la generación de fallas, la deformación plástica del material, junto con el espesor de este y la cota T (altura). Esto sugiere que ciertas aleaciones o materiales utilizados en la fabricación, así como su espesor y la altura (cota T), pueden no cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia necesarios para soportar las cargas aplicadas en condiciones normales de operación. Es importante tener en cuenta que el aumento en la cota T eleva la resistencia a la flexión con el cubo de su valor.

Por último, se observa que el anclaje del paragolpes en el chasis también ha sido una causa recurrente de fallas. Esto señala la importancia de un diseño y ensamblaje precisos en esta área, ya que un anclaje inadecuado puede provocar una desconexión entre el paragolpes y el chasis, comprometiendo la integridad del vehículo.

Conclusión: Los resultados indican la necesidad de una mayor atención en las áreas cercanas al punto P1, así como en la calidad de las soldaduras, la selección de materiales y la correcta fijación de componentes críticos como el paragolpes. Abordar estos aspectos con un enfoque en la mejora continua puede reducir significativamente la incidencia de fallas y aumentar la seguridad y confiabilidad de los vehículos fabricados.

Bibliografía

Norma IRAM/AITA 10260 Dispositivos traseros de protección (paragolpes); Datos obtenidos del sistema de calidad UIDET GEMA; Procedimiento de ensayo IRAM/AITA 10260; Decreto reglamentario 32/2018.

DISEÑO Y ANÁLISIS DE AEROFRENOS PARA UN VEHÍCULO LANZADOR

Juan Manuel Mancini, Guillermo Daniel Hamid, Facundo Pasquevich

Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Aeroespacial,

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

Calle 1 y 47, CP 1900, La Plata, Argentina.

juan.mancini@alu.ing.unlp.edu.ar

guillermohamid@alu.ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Los aerofrenos son dispositivos aerodinámicos que tienen la función de reducir la velocidad de un vehículo aumentando la fuerza de arrastre que genera este al desplazarse por el aire. La ventaja principal que presentan estos dispositivos es que no requieren consumo de combustible para reducir la velocidad del vehículo, haciendo de su uso una alternativa económica para el vehículo.

En este trabajo se describen las etapas de avance realizadas para el diseño preliminar de los aerofrenos de un vehículo lanzador, las cuales incluyen el estudio del estado del arte de los aerofrenos, el análisis estructural de los diseños preliminares y el estudio de la respuesta en frecuencia, utilizando el método de elementos finitos mediante programas de análisis numérico.

Objetivo de los aerofrenos

El uso de aerofrenos en el vehículo lanzador se basa en la necesidad de reducir la velocidad de reentrada balística del vehículo, hasta alcanzar una rapidez tal que permita la apertura de los paracaídas, los cuales reducen aún más la velocidad para lograr la recuperación.

Estado del arte

Se analizan vehículos tanto terrestres como aéreos con aerofrenos y se resume en la Tabla 1 la información relevante. En este caso, el único vehículo lanzador que utiliza aerofrenos para la reentrada es el New Shepard de Blue Origin.

Tabla 1: Comparativa de los distintos aerofrenos analizados.

Vehículo	Tipo de aerofreno	Rango de uso	Años activo	Datos de interés
New Shepard	No poroso	0 < Ma < 1,1	2015 – Act.	• Vehículo espacial • Apertura a favor del flujo incidente con actuadores • Apertura a 5 km de altitud
Bloodhound LSR	Poroso	0 < Ma < 0,8	2019	• Vehículo terrestre • Apertura en contra del flujo incidente con actuadores • Expuesto a polvo y partículas

SAAB AJS-37	Poroso (inferiores) y no poroso (superiores)	0 < Ma < 0,92	1971 - 2005	• Aeronave militar • Apertura en contra del flujo incidente con actuadores • Fabricado de fibra de vidrio
Mirage F1	Poroso	Subsónico	1973 – Act.	• Aeronave militar • Apertura en contra del flujo incidente con actuadores • Utilizado solo en descenso a pista de aterrizaje
X-15	No poroso	1,5 < Ma < 6,7	1959 - 1968	• Aeronave experimental • Apertura en contra del flujo incidente, con actuadores • Cargas térmicas elevadas por reentrada hipersónica
F-105	No poroso	0 < Ma < 2,1	1958 - 1984	• Aeronave militar • Apertura en contra del flujo incidente con actuadores • Desaceleración efectiva en todo el rango de uso
F-111	No poroso	0 < Ma < 2	1967 - 2010	• Aeronave militar • Apertura en contra del flujo incidente, con actuador • Empleado también como compuerta del tren de aterrizaje principal

2. Parte experimental (Modelo)

Se proponen y analizan dos diseños de aerofrenos, llamados Estrategia 1 y Estrategia 2, los cuales que se muestran en la Figura 1. El aerofreno de la Estrategia 1 va montado sobre la aleta del lanzador, mientras que el de la Estrategia 2 se sitúa entre las mismas, por eso sus diseños son distintos.

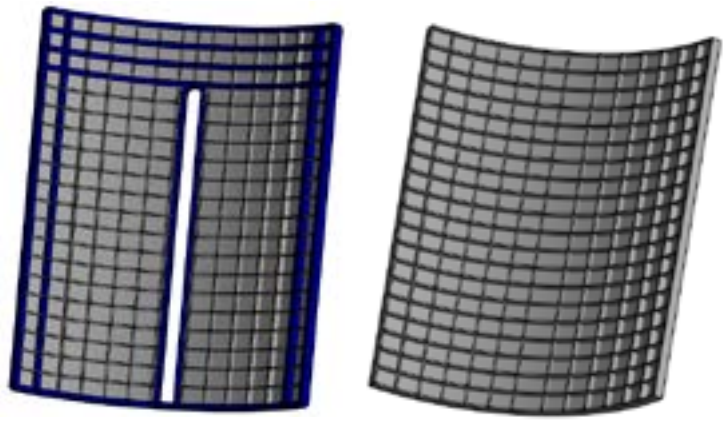


Figura 1: Modelo de Estrategia 1 (izquierda) y Estrategia 2 (derecha).

Se emplea un espesor general en la estructura para los largueros, las cuadernas y la chapa. Sin embargo, se deben incorporar refuerzos de mayor espesor para reducir las tensiones en el aerofreno de la Estrategia 1, los cuales son coloreados en azul en la Figura 1. La masa de la Estrategia 1 resulta entonces mayor que la de la Estrategia 2.

En la Figura 2 se muestra la disposición de los mismos en el módulo de empuje del lanzador.

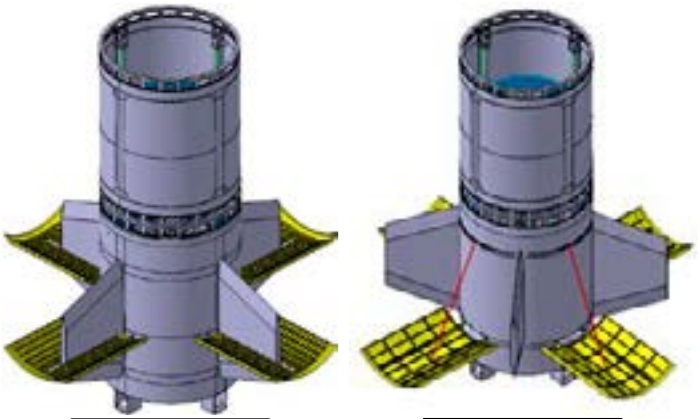


Figura 2: Disposición de los aerofrenos en el módulo de empuje del Vehículo.

Se realiza un análisis FEM en el software Ansys Mechanical, donde se modelan los aerofrenos de la Estrategia 1 y la Estrategia 2 con elementos de tipo Shell. Ambos mallados son equivalentes, con unos 200.000 nodos y 70.000 elementos aproximadamente.

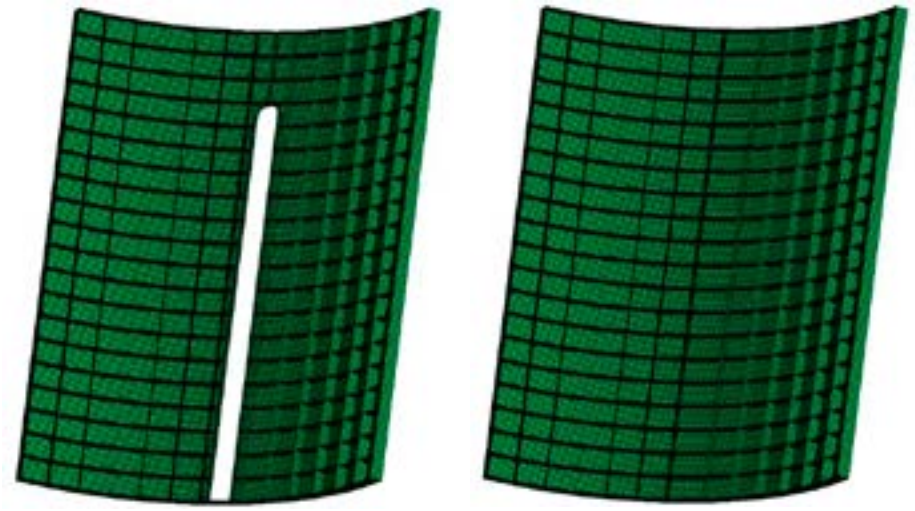


Figura 3: Mallado de la Estrategia 1 (izquierda) y Estrategia 2 (derecha).

Para la vinculación del modelo se modelan las bisagras como dos apoyos en la base del aerofreno que restringen los desplazamientos en los tres ejes y permiten las tres rotaciones de los nodos afectados.

Además, para la Estrategia 1 se establecen dos trabas que restringen el desplazamiento del modelo en el eje Z, mientras que para la estrategia 2 se modela un tensor como un apoyo simple que restringe el desplazamiento en los ejes Z y X.

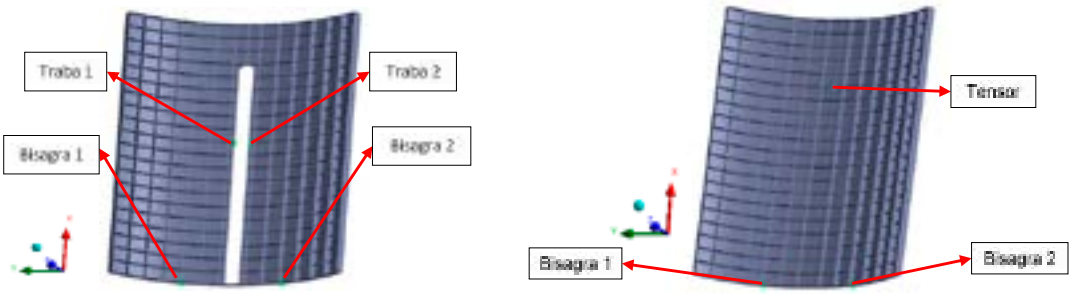


Figura 4: Apoyos en ambas estrategias.

Se utiliza un material que presente una alta tensión de fluencia, resistencia la desgaste y a las altas temperaturas y un módulo de elasticidad elevado para cumplir con los requerimientos y soportar las cargas de vuelo.

Análisis estático

La finalidad de este análisis es observar las tensiones producidas por un campo de presión invariante en el tiempo.

Para ello, se utilizan los resultados de un análisis CFD provisto por el Centro Tecnológico Aeroespacial. A partir de este último, se discretiza el campo de presiones como se muestra en la Figura 5, y se carga esta distribución en el módulo “Static Structural” para realizar un análisis FEM.

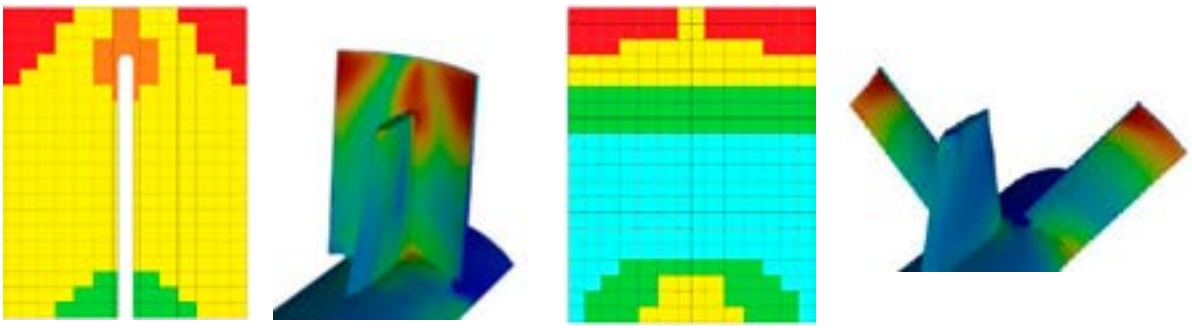


Figura 5: modelo de cargas aproximado y modelado en CFD para cada estrategia.

Análisis de respuesta en frecuencia

La finalidad de este análisis es observar cómo se comporta la estructura frente a vórtices en la parte trasera del aerofreno, que son modelados como una carga alternante de presión con variación senoidal, en un barrido de frecuencias, de valor igual a la presión trasera del caso estático según corresponda a cada estrategia.

Para ello, se realiza primero un análisis modal para obtener las frecuencias naturales de los modelos, y utilizarlas como base para el análisis de respuesta en frecuencia, y luego se realiza el barrido de frecuencias en el módulo “Harmonic Response”.

3. Resultados y discusión

A continuación, se muestran las distribuciones de tensiones de los análisis realizados. Además, se analizan las deformaciones y reacciones, sin embargo, estos resultados no se exponen en el presente informe.

Análisis estático

Se obtienen las distribuciones de tensiones que se muestran en la Figura 6.

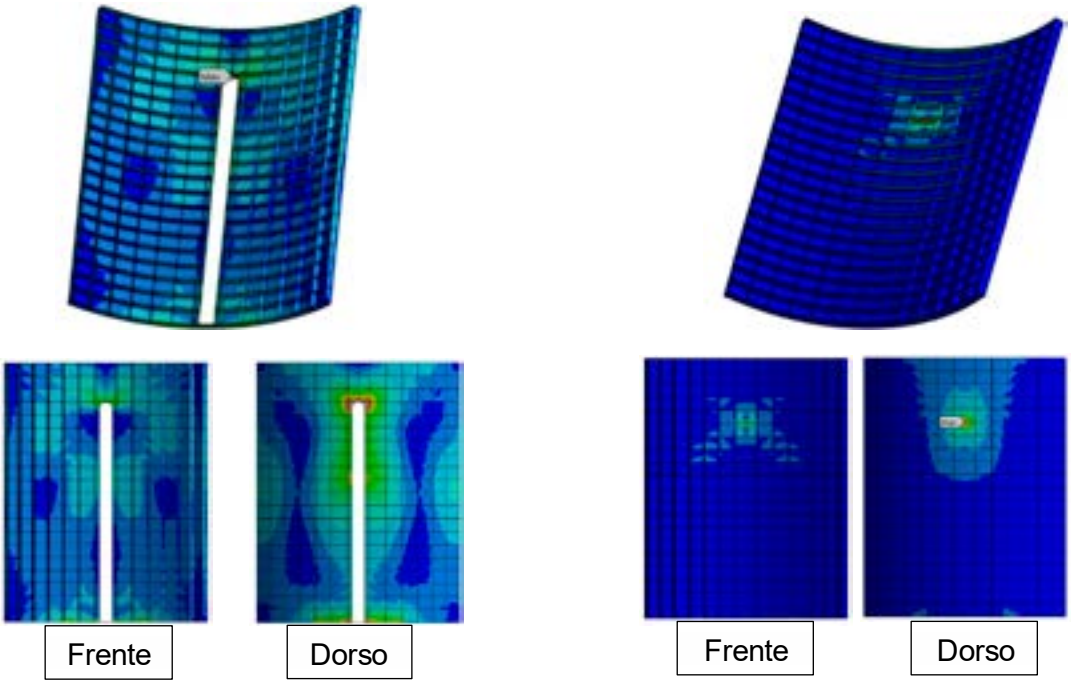


Figura 6: Tensiones debidas a una presión estática: Estrategia 1 (izquierda) y Estrategia 2 (derecha).

Respuesta en frecuencia

Se muestra en la Figura 7 el caso más crítico de respuesta en frecuencia para ambas estrategias.

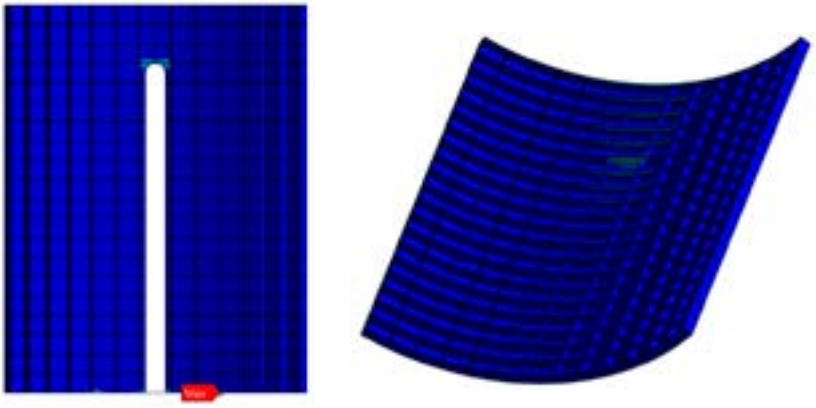


Figura 7: Tensiones debidas a la carga alternante más crítica: Estrategia 1 (izquierda) y Estrategia 2 (derecha).

En este caso, las tensiones están concentradas alrededor de las vinculaciones de cada estrategia, y no son apreciables en el resto de la estructura.

Combinación de resultados

En el caso real se tiene la combinación de ambos efectos, producidos por una presión constante y una oscilante, por lo que, para obtener una aproximación más cercana a la realidad, se suman ambos efectos y se obtienen los resultados de las Figura 8 y Figura 9.

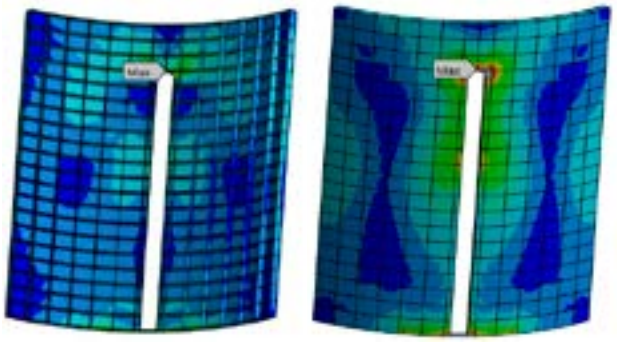


Figura 8: Tensiones equivalentes del caso estático y dinámico (Estrategia 1).

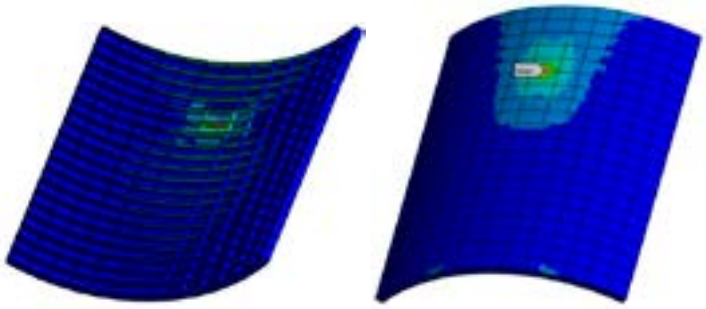


Figura 9: Tensiones equivalentes del caso estático y dinámico (Estrategia 2).

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se sacan las siguientes conclusiones:

- Las tensiones en la Estrategia 1 se encuentran distribuidas de forma más uniforme que en la Estrategia 2. En esta última, las tensiones máximas se dan en puntos de concentración, mientras que en el resto de la estructura los esfuerzos son menores, por lo que hay posibilidad de optimización (reducción de peso).
- La diferencia de peso de ambas estrategias es apreciable, siendo el aerofreno de la Estrategia 1 el más pesado.
- Las tensiones producto de las cargas oscilantes según este modelo aumentan considerablemente y en ordenes similares para ambas estrategias.
- Además, las reacciones y deformaciones analizadas son más críticas para el caso de la Estrategia 1.

Según el análisis realizado, la Estrategia 1 no cuenta con ninguna ventaja clara desde el punto de vista estructural, como es de esperarse debido a que posee un orificio central que le quita rigidez al conjunto.

5. Bibliografía

Cook R. D. (1995). *Finite Element Analysis for Stress Analysis*. Wiley.

Bruhn, E. F. (1965). *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. Tri-State Offset.

Ogata, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. Prentice Hall Hispanoamericana.

DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS DE AERONAVES MEDIANTE DISTINTOS MÉTODOS DE CÁLCULO

Lhuillier, Ernestina; Bertarelli, Bautista; Donati, Javier y Delnero, Juan Sebastián

Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina.

E-mail: ernestinalhu@gmail.com

Introducción

El análisis aerodinámico de aeronaves VTOL (Vertical Take Off and Landing) presenta desafíos particulares, debido principalmente a la interacción de múltiples superficies aerodinámicas en diseños no convencionales, y por las complejas características del flujo en configuraciones con múltiples rotores. En las etapas preliminares de diseño, es fundamental contar con herramientas de cálculo que permitan estimar los coeficientes aerodinámicos de manera eficiente, evitando la necesidad de recurrir a métodos más costosos y demandantes computacionalmente, como la dinámica de fluidos computacional (CFD).

En la actualidad, existen diversas herramientas de cálculo preliminar basadas en metodologías analíticas y semi-empíricas. Las metodologías analíticas usualmente se basan en métodos de cálculo potenciales, a partir de distribución de singularidades para la representación del campo de flujo. Dichos métodos presentan limitaciones al no contemplar efectos viscosos, por lo cual, los resultados obtenidos se complementan con metodologías semiempíricas, o módulos de cálculo particulares que permitan analizar dichos efectos. Estas son herramientas ampliamente utilizadas en estudios preliminares de diseño, debido a su capacidad para estimar fuerzas y momentos aerodinámicos con bajo costo computacional.

Además, en función del tipo de aeronave, se deben considerar efectos adicionales como puede ser, por ejemplo, las interacciones que se producen por el flujo generado por los motores. Este es el caso particular de una gran cantidad de configuraciones VTOL, donde se requieren varios motores para alcanzar el empuje requerido para los despegues y aterrizajes verticales. Por este motivo, en la actualidad se están desarrollando softwares que incluyan este tipo de análisis, como es el caso del software DUST[1]. Este permite modelar la interacción entre el flujo de aire y los rotores, considerando efectos como la variación de potencia y el rendimiento bajo diferentes condiciones de vuelo.

En este trabajo, se emplean distintos softwares de cálculo basados en distintas metodologías para analizar una geometría de aeronave VTOL. En particular, se utilizan el OpenVSP, XFLR5 y el Digital DATCOM, con el objetivo de comparar y analizar las diferencias en los resultados obtenidos. También se incluyen de forma comparativa resultados obtenidos con el software DUST para la misma aeronave, a partir de los resultados del trabajo de tesis[2]. En contraste, en los cálculos realizados con OpenVSP, XFLR5 y Digital DATCOM no se consideraron los efectos de los rotores, por lo que la comparación de los resultados permitirá evaluar el impacto de flujo inducido por las hélices.

Metodología

El vehículo de referencia analizado es la aeronave eVTOL Vahana Alpha (Figura 1), desarrollada por Airbus. Este prototipo, fue diseñado para operar de manera autónoma y propulsado por un sistema eléctrico. Su configuración de convertiplano, con alas basculares y ocho motores eléctricos, le permitía realizar despegues y aterrizajes verticales, además de una transición eficiente al vuelo horizontal, volando en pruebas a escala real entre 2018 y

2019. En la Tabla 1 se presentan las especificaciones de interés. Para el análisis aerodinámico se consideran las condiciones de estudio relevantes para la operación del vehículo que se muestran en la Tabla 2.



Figura 1. Representación gráfica del Vahana Alpha.

Tabla 1. Especificaciones generales del Vahana Alpha.

Velocidad crucero	$\mathbf{190 - 200}$	$[\boldsymbol{km/h}]$
Envergadura	$6{,}25$	$[m]$
Longitud del fuselaje	$5{,}7$	$[m]$
Diámetro hélices	$1{,}5$	$[m]$

Tabla 2. Parámetros seleccionados para el análisis aerodinámico del vehículo

$\boldsymbol{V_\infty}$	$\mathbf{10}\ \boldsymbol{a}\ \mathbf{20}\ [\boldsymbol{m/s}]$
$\boldsymbol{\alpha}$	$-5\ a\ 10\ [deg]$

Las herramientas de cálculo utilizadas para evaluar el comportamiento aerodinámico del vehículo son el OpenVSP, XFLR5 y Digital DATCOM. En función de las limitaciones de cada programa, se analizan dos casos de estudio: uno que incluye ambas alas (principal y secundaria), y otra que incluye ambas alas y el fuselaje.

En particular, OpenVSP y XFLR5 son herramientas de código abierto que permiten modelar y analizar configuraciones aerodinámicas mediante distintos métodos de cálculo analíticos. Entre estos se incluyen el método de los paneles 3D y *Vortex Lattice Method* (VLM), que se basan en discretizar la superficie del vehículo para estimar la distribución de presiones, para luego obtener las fuerzas y momentos aerodinámicos sobre el cuerpo. El OpenVSP se encuentra diseñado para la modelización y análisis de configuraciones tridimensionales, mientras que el XFLR5 está orientado al análisis aerodinámico de superficies sustentadoras. El Digital DATCOM, por su parte, es una herramienta de cálculo basada en modelos semi-empíricos, derivados de datos experimentales. Su método se basa en la interpolación de coeficientes aerodinámicos a partir de bases de datos preexistentes, permitiendo estimas fuerzas y momentos aerodinámicos en función de la carga de parámetros geométricos y condiciones de vuelo. La carga de la geometría del vehículo se realiza de manera modular, a través de una serie de bloques de entrada en un archivo de texto, donde cada sección de la aeronave se define de forma independiente mediante parámetros que describen su forma, dimensiones y ubicación.

Para ingresar la geometría en los softwares OpenVSP y XFLR5, se realizó el modelado geométrico en sus interfases correspondientes, para luego generar el mallado, buscando una representación precisa de la aeronave y optimizando la disposición de los paneles para obtener resultados aerodinámicos confiables. En ambos casos, el fuselaje se discretizó en secciones transversales, extrayendo el ancho y el alto de cada una para reconstruir su forma mediante interpolación. Se analizó particularmente la integración del fuselaje con las alas, evitando irregularidades o intersecciones inadecuadas que pudieran generar errores en los

elementos cercanos, que llevan a la no convergencia del cálculo. Para asegurar una intersección completa entre estas superficies, se ajustaron las dimensiones del fuselaje en la zona de unión con las alas. En particular, para las superficies sustentadoras, la densidad de paneles se ajustó en función de los gradientes esperados, concentrándolos en las puntas de ala, donde la sustentación varía bruscamente.

Al analizar la configuración completa del avión en XFLR5, las alas se representan como superficies delgadas debido a las limitaciones del programa. La forma en la que implementa el método de los paneles 3D no permite modelar adecuadamente la interacción entre el ala y el fuselaje, lo que introduce inestabilidades numéricas durante la simulación, impidiendo la convergencia de los resultados. Dado que no es posible mitigar los errores derivados de la interacción entre el fuselaje y las alas, se ha decidido excluir el fuselaje del análisis con este software y utilizar únicamente una geometría simplificada para las simulaciones.

Se realizaron múltiples simulaciones en ambos softwares para encontrar una configuración que equilibre resolución y tiempo de simulación, garantizando la convergencia y estabilidad de los resultados. En OpenVSP, los parámetros influyentes del mallado incluyen el número de curvas teseladas en la dirección longitudinal y transversal, además del ajuste en la distribución de los paneles para mejorar la resolución en zonas críticas. En XFLR5, además del número de paneles, es necesario definir el tipo de distribución en la dirección de la cuerda y a lo largo de la envergadura, lo que permite un control más detallado sobre la refinación del mallado en regiones de interés. En la Figura 2 se muestra la geometría final de la aeronave mallada en XFRL5 (izquierda) y OpenVSP (derecha).

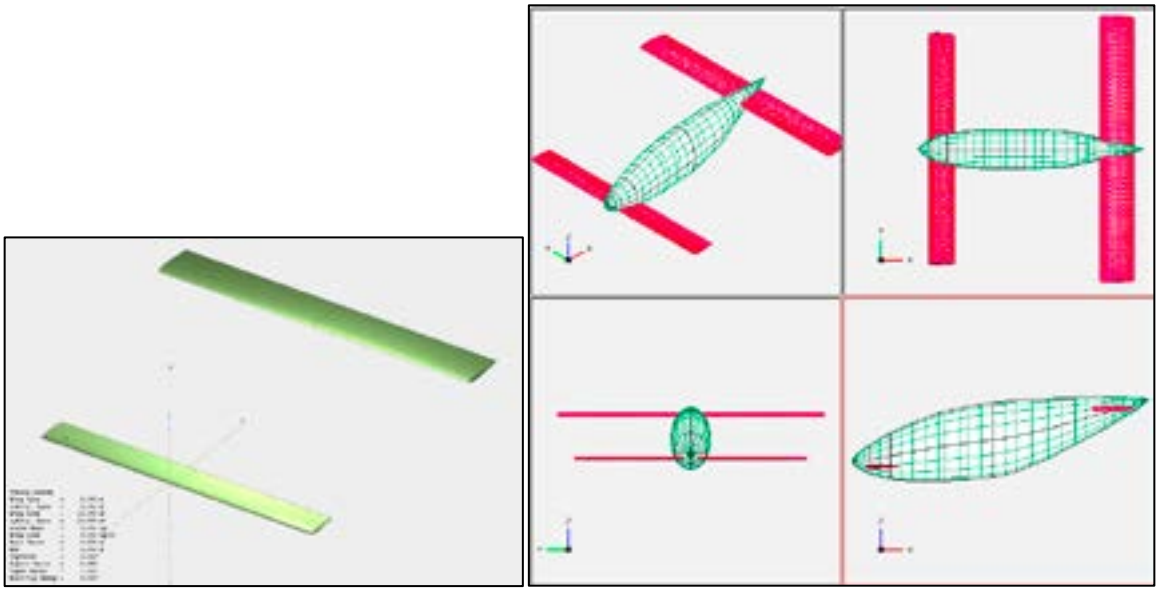


Figura 2. Geometría final modelada en XFLR5 (izquierda) y OpenVSP (derecha).

Para garantizar una integración precisa de las superficies modeladas, OpenVSP utiliza la herramienta *CompGeom*, que genera una malla triangulada a partir de la intersección de superficies, asegurando una representación geométrica coherente. En el caso del fuselaje, la resolución del mallado se define con el objetivo de obtener una superficie uniformemente integrada, minimizando la aparición de valores anómalos en los resultados. Para ello, se ajusta iterativamente la cantidad de paneles en la dirección longitudinal y transversal hasta alcanzar una configuración óptima (Figura 3).

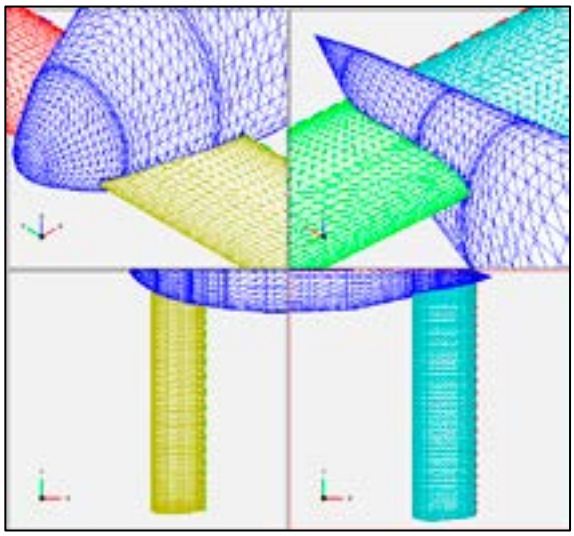


Figura 3. Malla triangulada generada por la herramienta CompGeom en OpenVSP. En el caso del Digital DATCOM, se realiza la carga completa de la configuración, incluyendo ambas alas y el fuselaje.

Resultados

Se comparan los resultados obtenidos en términos del coeficiente de sustentación, el coeficiente de resistencia total y el coeficiente de momento, este último calculado respecto de una posición arbitraria con fines comparativos.

El primer caso considerado es la geometría del ala principal junto con el ala secundaria. Los resultados son comparados utilizando OpenVSP, XFLR y DATCOM, permitiendo evaluar las diferencias en las predicciones aerodinámicas de cada software. Se incluye, además, los resultados obtenidos de DUST[2] para el coeficiente de sustentación. En la Figura 4 y Figura 5 se muestran los resultados obtenidos en este caso.

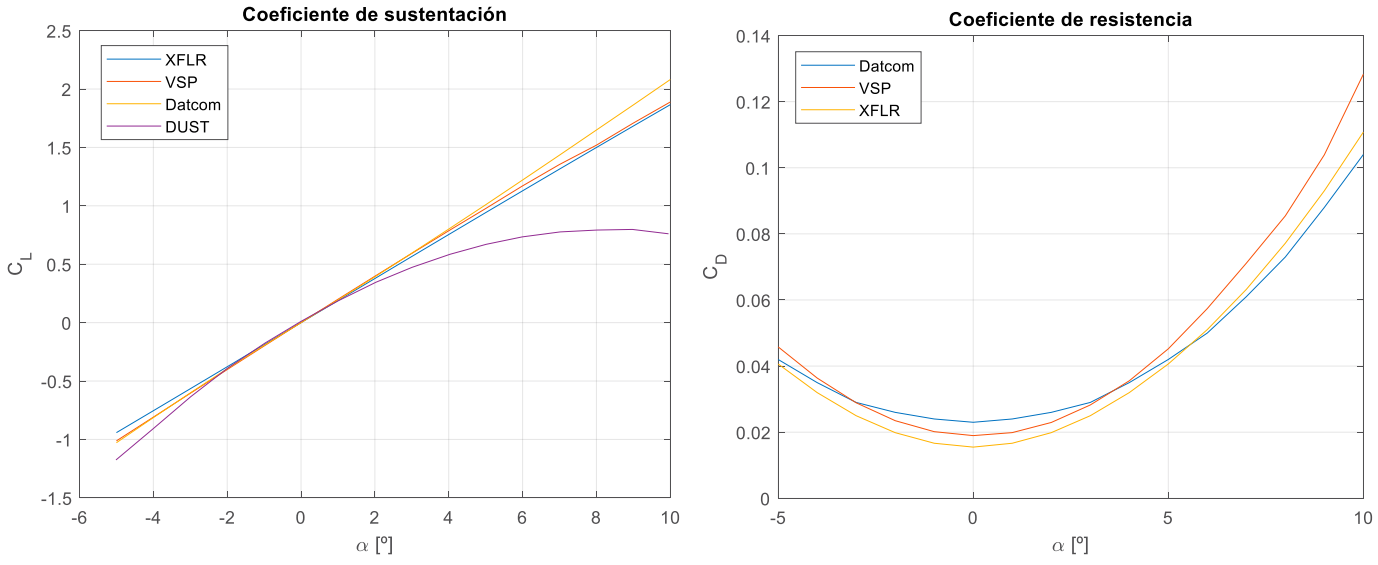


Figura 4. Curvas de coeficientes de sustentación y resistencia obtenidas sin fuselaje con los distintos softwares de cálculo

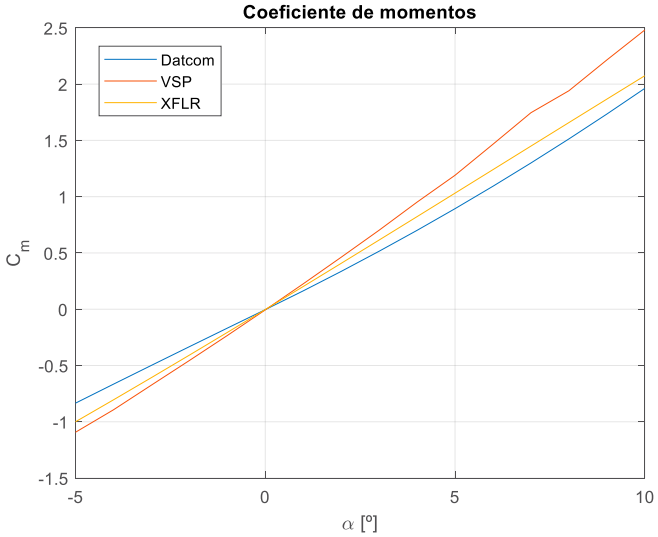
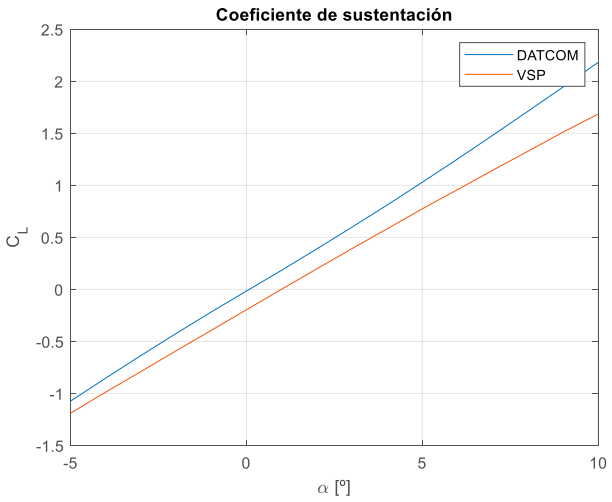


Figura 5. Curvas de coeficientes de momentos obtenidas sin fuselaje con los distintos softwares de cálculo.

Los resultados obtenidos en esta primera configuración muestran una notable similitud en el coeficiente de sustentación, lo que indica que los tres softwares producen resultados consistentes dentro del rango bajo estudio. Sin embargo, al analizar los datos extraídos de DUST, se observa un comportamiento diferenciado; mientras que en el intervalo de ángulos de ataque entre -2º y 2º los resultados coinciden con los obtenidos en los tres programas, a partir de este punto queda en evidencia una entrada en pérdida más temprana, alcanzando su $C_{L,máx}$ alrededor de los 9º. Entre los softwares utilizados, sólo el Digital DATCOM permite estimar la pérdida, aproximándola en $\approx 15º$. La principal diferencia entre DUST y los otros métodos utilizados es la inclusión del módulo de la hélice. Se plantea la hipótesis de que la rotación de las hélices introduce un flujo rotacional que modifica el campo de velocidades en torno a las alas, aumentando el ángulo de ataque en ciertas regiones mientras lo disminuye en otras. Este fenómeno podría generar una entrada en pérdida más temprana en algunas partes del ala y a su vez, debido a la energización del flujo, la transición sería más gradual y extendida. La validación de la hipótesis planteada requiere ensayos en túnel de viento. En cuanto a los coeficientes de momento y resistencia, los resultados muestran variaciones mínimas entre los diferentes métodos utilizados, manteniendo tendencias similares en todos los casos presentados.

El segundo caso analizado incluye, además de ambas alas, el fuselaje del avión. En la Figura 6 y Figura 7 se realiza una comparativa de los resultados obtenidos con el fuselaje a través de DATCOM y OpenVSP.



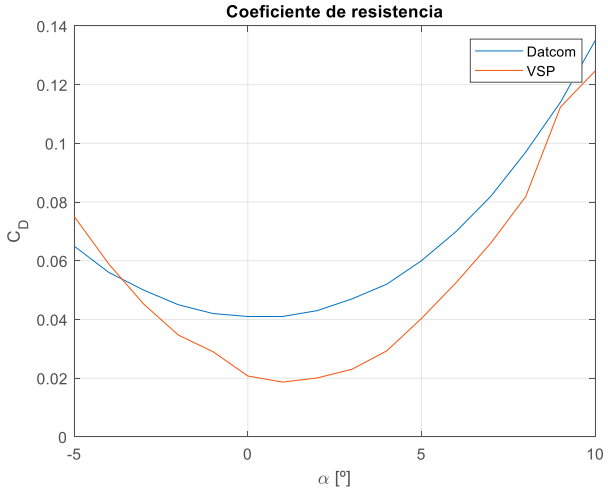


Figura 6. Curvas de coeficientes de sustentación y resistencia obtenidas con fuselaje a través de DATCOM y OpenVSP.

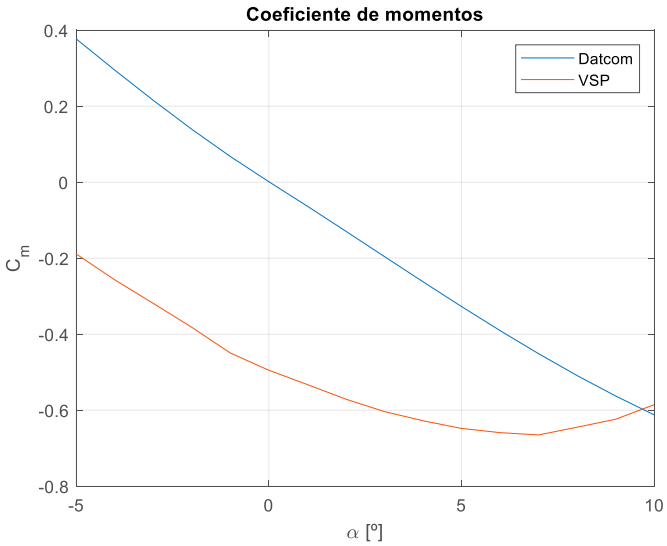


Figura 7. Curvas de coeficiente de momentos obtenidas con fuselaje a través de DATCOM y OpenVSP.

Los resultados obtenidos al incluir el fuselaje evidenciaron que, a pesar de un refinamiento considerable del mallado, OpenVSP presenta problemas de convergencia en el cálculo, particularmente en la región de intersección entre las alas y el fuselaje. En esta zona, se generan valores anómalos, lo que sugiere inconsistencias numéricas durante la simulación. A través de múltiples iteraciones, se observó que la capacidad de convergencia se ve comprometida al aumentar la complejidad del modelo, con mayores dificultades encontradas en las intersecciones entre las alas y el fuselaje.

Conclusiones

Luego de evaluar la diferencia entre los coeficientes aerodinámicos obtenidos en ambos casos de estudio (con y sin la inclusión del fuselaje), se identifica el impacto de esta componente en la precisión de los resultados y en las discrepancias entre cada software de cálculo. Los análisis sin fuselaje muestran resultados similares entre ambos softwares, con diferencias pequeñas, pero mismas tendencias en la estimación de los coeficientes aerodinámicos. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos a partir de DUST, se evidencia que la presencia del flujo inducido por los rotores modifica el comportamiento aerodinámico, adelantando la entrada en pérdida a ángulos de ataque considerablemente más bajos de los que predice Datcom.

Al incluir el fuselaje, se observaron discrepancias significativas entre los resultados obtenidos con OpenVSP y DATCOM, particularmente en la estimación del coeficiente de momentos. Estas diferencias pueden atribuirse a la forma en que cada software modela la interacción entre el fuselaje y las superficies sustentadoras, así como a variaciones en la generación del mallado y en la implementación del método de los paneles. La estabilidad numérica de OpenVSP puede verse afectada por configuraciones con fuselajes integrados, requiriendo estrategias adicionales para mejorar la calidad de la simulación.

Bibliografía

[1]. DUST. (s.f.). *Distributed-Urban-Air-Mobility Simulation Tool*. Politecnico di Milano. https://www.dust.polimi.it/

[2]. Perdolt, D. (2022). *Efficient aerodynamic modeling process for a tilt-wing evtol using a mid-fidelity computational tool* (Doctoral dissertation, Technical University of Munich).

DISEÑO DE COMANDOS AERODINÁMICOS MEDIANTE SISTEMA DE SHAPE-MORPHING EN FLUJO TURBULENTO DE BAJO REYNOLDS

Paoli, Leandro Ignacio[a]; Donati, Javier[a,b] y Marañón Di Leo, Julio[a,b]

[a]*Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina.*

[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Avenida Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.*

E-mail: leandropaoli@alu.ing.unlp.edu.ar

Introducción

Los avances en los últimos años en los desarrollos de vehículos autónomos tipo UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) y MAVs (*Micro-Aerial Vehicles*) han aumentado el interés en el estudio de la aerodinámica de bajo Reynolds. En estas condiciones de flujo, ocurren fenómenos que tienden a disminuir la performance aerodinámica, sumado problemáticas propias de las condiciones de operación, que exigen sistemas de control ágiles y eficientes.

Los comandos aerodinámicos convencionales llevados a estas condiciones de flujo se encuentran limitados, debido a que se basan en superficies móviles que producen discontinuidades geométricas y ranuras sobre el perfil aerodinámico, que puede llevar al desprendimiento prematura de la capa límite y la consecuente disminución de su eficiencia aerodinámica [1], [2]. Debido a esto, surge el concepto de diseño de comandos aerodinámicos no convencionales, como es el caso de los sistemas de comandos por shape-morphing del ala. Estos sistemas se basan en producir la variación completa de la curvatura del perfil aerodinámico del ala, de forma suave y continua, mejorando la performance del comando, retrasando fenómenos de desprendimiento de la capa límite y reduciendo la resistencia [1].

En la actualidad existen diversos métodos para producir variaciones geométricas del perfil alar, siendo los más estudiados actuadores piezoeléctricos y mecánicos[3]. Dependiendo de la aplicación, los sistemas mecánicos representan una alternativa que trae ventajas. Permiten simplificar la implementación, requiriendo actuadores mecánicos y componentes, comparativamente de bajo costo respecto otros sistemas, que se pueden instalar dentro de una estructura mecánica deformable diseñada de acuerdo con el tipo de variación geométrica deseada. Además, poseen una velocidad de respuesta adecuada para su aplicación en deformaciones estáticas para su uso como comando.

En base a esto, en este trabajo se presenta el diseño y construcción de un modelo de ala con un sistema de comando por shape-morphing para variar la curvatura del perfil aerodinámico. Para esto, se diseñan modelos con diferentes geometrías y mecanismos de deformación, con el fin de hallar uno que permita un cambio de curvatura deseado con el menor esfuerzo mecánico posible.

Metodología

En primera instancia, se seleccionó el tipo de perfil a utilizar. Esta elección se encuentra limitada por la condición de ensayo de bajo Reynolds, en donde se buscan perfiles de bajo espesor, pero que a la vez disponga el espesor mínimo que permita disponer el espacio necesario para instalar el sistema mecánico de control y, además, soportar las cargas aerodinámicas sin producir deformaciones excesivas en el modelo de ala.

En base a esto, se utiliza un perfil NACA 0012 (Figura 1), considerando, además, que se trata de un perfil simétrico (sin curvatura), lo que implica que cualquier pequeño incremento en la curvatura tenga un efecto directo y fácil de ver tanto en la sustentación como en la resistencia. La cuerda seleccionada para los modelos es de 15 cm, definida en función del túnel de viento seleccionado para los ensayos.

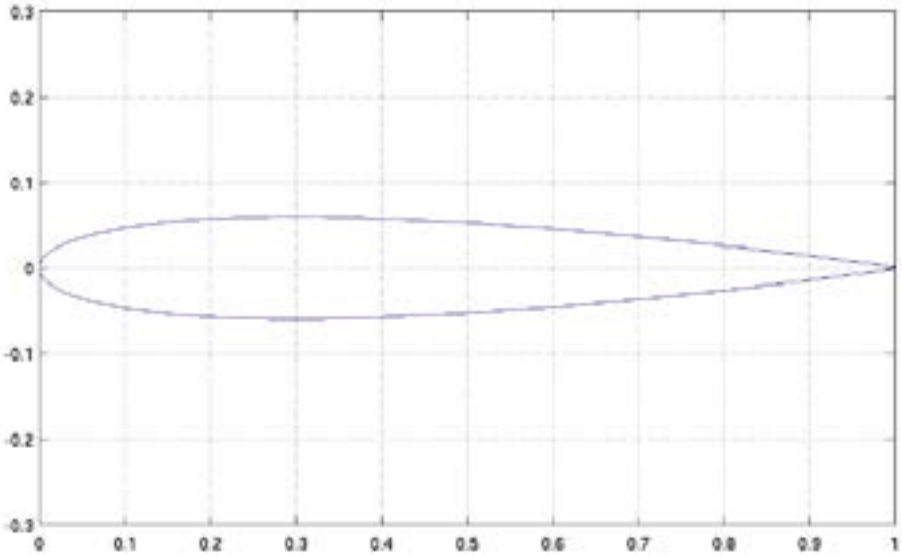


Figura 1: Perfil NACA 0012.

Teniendo estas bases para el diseño, se analizaron diferentes diseños y mecanismos para lograr la variación en la curvatura. Inicialmente, los modelos obtenidos eran demasiado rígidos y el volumen encerrado dentro del ala era muy pequeño. Esto último es un inconveniente ya que cuanto mas espacio ocupe el mecanismo encargado de la deformación, menos espacio de deja para el resto de los elementos necesarios para realizar el ensayo en túnel, como varillas y acoples, por ejemplo. Los diseños analizados fueron construidos por impresión 3D, mediante combinaciones de filamentos rígidos, como PLA y PETG, y filamentos flexibles, como TPU (poliuretano termoplástico). En la Figura 2 se muestran algunos de los diseños analizados inicialmente.



Figura 2: Primeros mecanismos de deformación.

Los modelos iniciales (Figura 2Figura 2, primer y segundo diseño) cuentan con una estructura deformable que trabaja de forma similar a un resorte, construidos totalmente en PLA, que evolucionaron hasta la combinación de filamentos PLA y FLEX (Figura 2, tercer diseño). La combinación de materiales rígidos y flexibles trae aparejado varias ventajas, como en caso de tener un problema localizado se vuelve imprime solo la parte defectuosa, ahorrando así materiales y tiempo, y, principalmente, posibilita generar deformaciones localizadas de forma más sencilla. En este diseño particular se pueden diferenciar las cuatro partes principales de un perfil: borde de ataque, extradós, intradós y borde de fuga, todas ellas impresas por separado como piezas independientes y luego ensambladas como un perfil.

Sin embargo, todos los modelos construidos que replican un resorte que se comprime para generar una curvatura producen que, cuando la curvatura es moderada, la deformación se inestabiliza, siendo imposible predecir la dirección de la deformación por efecto del pandeo local. Esto es ante una compresión, una parte de la estructura se deforma o pandea independientemente del resto. Por lo tanto, este tipo de mecanismos se descartaron.

A partir de esto, se desarrolla un diseño que satisface todas las necesidades mencionadas antes. Consiste en un modelo compuesto de tres piezas independientes: un borde de ataque anexado al intradós, el borde de fuga y el extradós (Figura 3).



Figura 3: Concepto final seleccionado.

En este diseño, el borde fuga posee una ranura alojada por la que se desplaza una corredera solidaria al intradós (Figura 4). Los materiales constituyentes son PLA para el borde de ataque/intradós y el borde de fuga, mientras que para el extradós se utiliza filamento TPU.

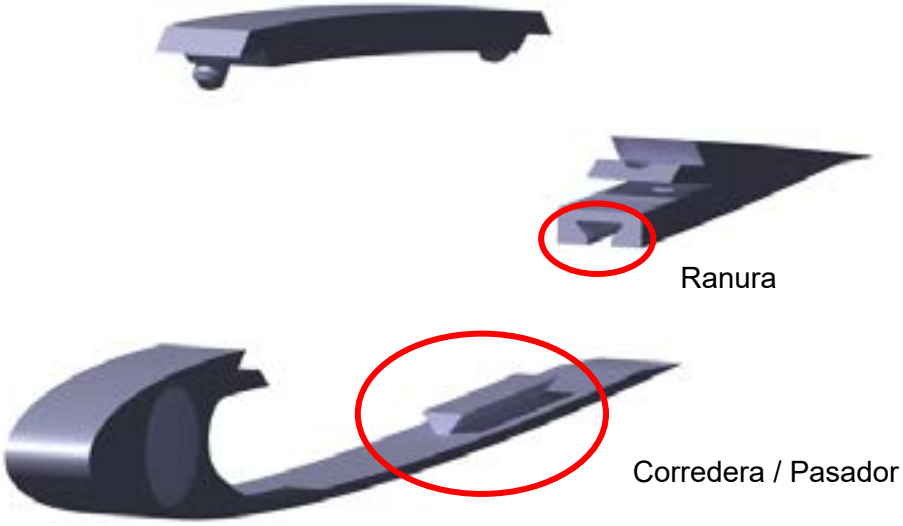


Figura 4: Vista en explotada donde se observan la ranura y corredera.

Resuelto el mecanismo encargado de permitir la deformación, se desarrolla el sistema de actuación que efectivamente curvará al perfil. Antes de comentar el funcionamiento del sistema, se debe aclarar que al momento del ensayo, el ala tendrá un solo punto de anclaje y este estará en el borde de ataque. Esto implica que dicha zona estará fija durante todo el ensayo. Para esto lo que propuso fue colocar dos cilindros concéntricos en donde el exterior (hueco) hace de de soporte para el interior, el cual funciona como eje. En este ultimo se enrolla una tanza que esta conectada al borde de fuga. Al enrollarse la tanza, debido a la rotación del eje el borde de fuga se ve atraído hacia el borde de ataque, en consecuencia, se produce una curvatura aproximadamente al 50% de la cuerda.

En la Figura 5 se pueden ver los componentes mencionados. En color verde se puede ver el caño hueco de ½" el cual aloja al eje (rosa) de 5 mm de diámetro, en el cual se enrolla la tanza conectada al borde de fuga. En azul se observan los bujes. Cabe destacar que el borde de fuga tiene varios orificios lo que permite que se anuden a él hasta cinco cables, sin embargo, en la figura se puede ver uno solo a modo representativo.

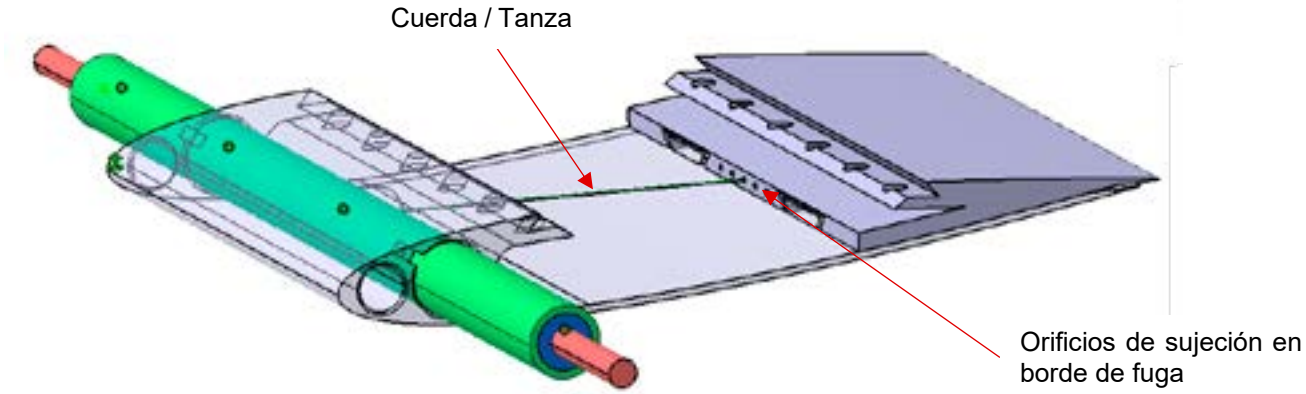


Figura 5: Modelo de ala con sistema de accionamiento.

Además, también se puede observar que en el borde de ataque se tiene otro agujero pasante que se ubica por delante del caño (verde). Este aloja una varilla de 8 mm, la cual está destinada a evitar la rotación del ala respecto del caño de ½" (verde). En la Figura 6 se muestra un detalle de la zona interior del borde de ataque.

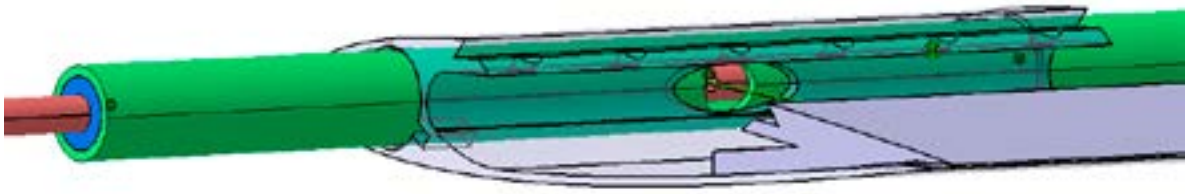


Figura 6: Detalle del interior del borde de ataque.

Resultados

El diseño final desarrollado anteriormente es construido en un módulo de 10 cm de envergadura y probado para evaluar el comportamiento. En la Figura 7 se observa como al girar el eje se tensan las tanzas desplazando horizontalmente al borde de fuga y generando la curvatura buscada. También se puede observar la presencia de la varilla de 8 mm antes mencionada, la cual está cumpliendo su función soporte.

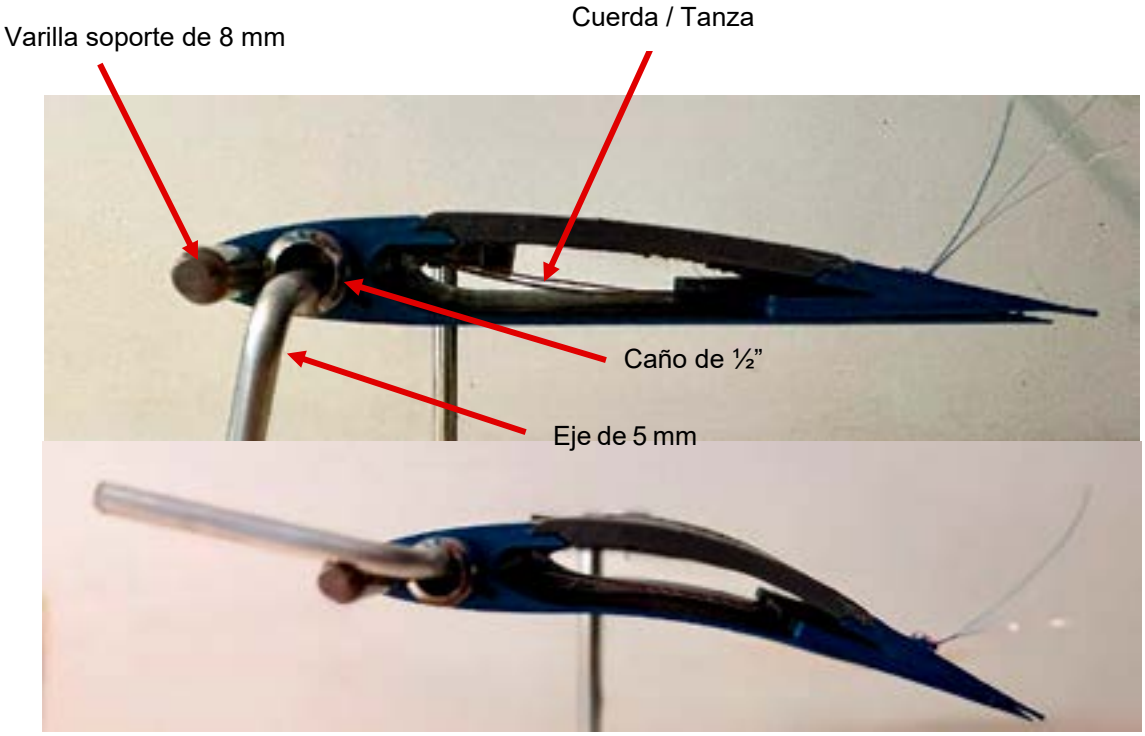
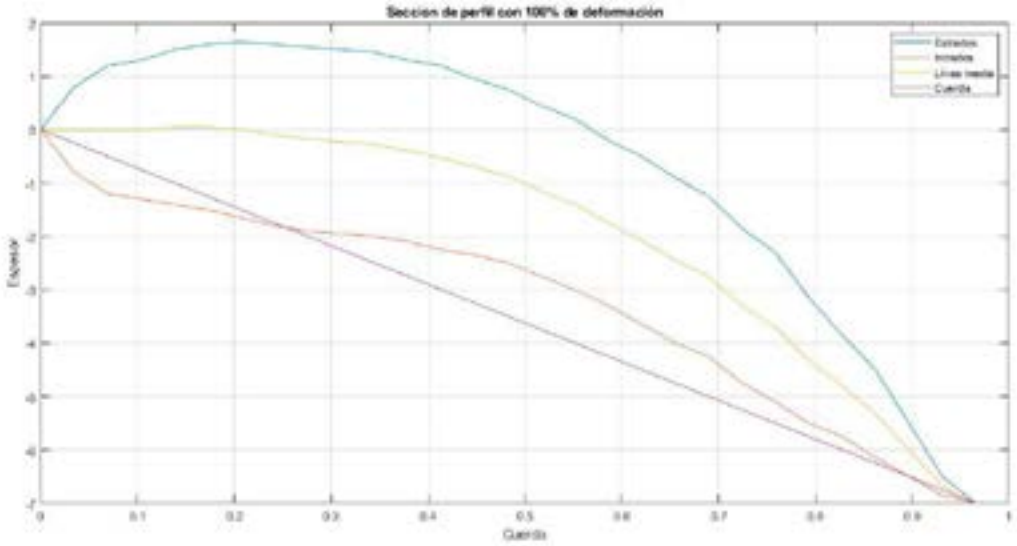


Figura 7: Resultados.

Para la condición de máxima deformación mostrada en la Figura 7 se relevan los puntos que conforman la sección y a partir de un código desarrollado en Matlab, estos datos son procesados. De este estudio se obtienen datos como la curvatura máxima y en que porcentaje de cuerda se halla este valor.



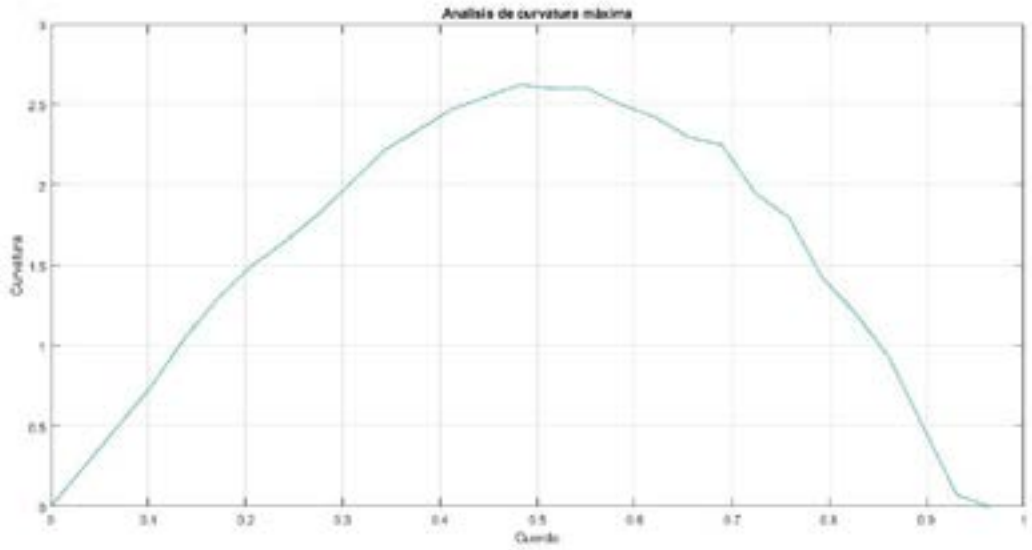


Figura 8: sección y curvatura

Conclusiones

Se puede observar en el grafico superior de la Figura 8 el perfil de la Figura 7 digitalizado. Gracias a esto es posible trazar otras entidades geométricas como la línea media y la cuerda. Al conocer estas últimas, se calcula la curvatura como la diferencia entre ambas. En el grafico inferior de la Figura 8 se muestra la evolución de la curvatura respecto de la cuerda del perfil. De esta manera es muy fácil visualizar el valor máximo de deformación y a qué porcentaje de cuerda se halla. En este caso la curvatura máxima es de 2.6% (en porcentaje de cuerda) y se ubica casi al 50% de la cuerda.

Las siguientes instancias implican la construcción completa del modelo, llegado este a una envergadura de 40 cm y sus respectivas pruebas en túnel de viento, donde se lo expondrá a cargas aerodinámicas las cuales pueden afectar la forma de deformación.

Bibliografía

[1] Ohanian, O., Hickling, C., Stiltner, B., Karni, E., Kochersberger, K., Probst, T., & Blain, A. (2012, April). Piezoelectric morphing versus servo-actuated MAV control surfaces. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA (p. 1512).

[2] Probst, T. A. (2012). Evaluating the aerodynamic performance of MFC-actuated morphing wings to control a small UAV (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

[3] Gomez, J. C., & Garcia, E. (2011). Morphing unmanned aerial vehicles. Smart Materials and Structures, 20(10), 103001.

LANZADORES RECUPERABLES: ANÁLISIS Y SIMULACIÓN POR CFD DE RESISTENCIA AERODINÁMICA EN AEROFRENOS

Autores: Fuentes, M. Ezequiel; Herrera, Matías A.

Lugar de trabajo: Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA-UNLP)

Dirección: calle 116 e/47 y 48. La Plata, Buenos Aires, Argentina. CP 1900.

E-mail: fuentesmartinezequiel@alu.ing.unlp.edu.ar

Introducción

La recuperación de cohetes es el eje de un nuevo paradigma en la exploración espacial, y un paso intermedio clave para una futura reutilización. Bajo esta premisa, es que se busca un método de recuperación que permita un amerizaje suave de una primera etapa de un lanzador. Esto último, es importante para la conservación de recursos tales como partes críticas, reduciendo el desperdicio de materiales y evitando la contaminación de los océanos. A su vez, se vela por la seguridad operativa, dado que el analizar componentes recuperados permite identificar fallos potenciales y mejorar el diseño futuro.

Bajo esta premisa, es que se adopta un método de recuperación de lanzadores a través de la implementación de aerofrenos, o frenos aerodinámicos, que permitan disminuir la velocidad terminal de la primera etapa para que posteriormente puedan desplegarse paracaídas y se lleve a cabo un amerizaje suave para recuperar el lanzador.

En virtud de lo mencionado, el Grupo de Fluidodinámica Computacional (UIDET GFC) utilizando el paquete de herramientas de ANSYS, lleva adelante simulaciones en 3D de tres diseños de aerofrenos analizando dos ubicaciones posibles en la primera etapa de un lanzador suborbital.

El propósito es la caracterización del campo fluidodinámico, y la determinación y comparación cuantitativa de la resistencia aerodinámica generada para tres diseños de aerofrenos 3D en condiciones de vuelo de Mach 0.5, 1, 2 y 4.

Una vez obtenidos los coeficientes de arrastre, se los compara con resultados obtenidos previamente mediante un software llamado Missile Datcom, el cual mediante una base de datos experimental y extrapolaciones, permite obtener una aproximación de la resistencia aerodinámica de diversos cuerpos inmersos en el seno de un fluido, en este caso, aire [1]. Por lo que resulta de interés, verificar los resultados propios de dicho programa.

Parte experimental

Inicialmente para el análisis de resistencia aerodinámica de aerofrenos, se parte de un modelo de CAD 3D del lanzador, para el cual, aprovechando la simetría que presenta la geometría, se decide tomar ¼ de revolución (véase la Figura 1). Esto permite disminuir la complejidad del problema y obtener resultados en tiempos de cómputos menores debido a la menor cantidad de elementos.



Figura 1

Para el mallado se empleó un esquema multibloques a los efectos de optimizar la cantidad y calidad de elementos, contando con una malla hibrida con elementos hexaédricos, tetraédricos y piramidales. Además, el mallado de la capa limite se encuentra estimado en base a las características del fluido y la corriente incidente mediante una primera aproximación en base al modelo de un cilindro inmerso en una corriente. Luego, la cantidad de elementos para estos casos de análisis de resistencia aerodinámica ronda los 7 millones de elementos con parámetros de calidad de malla acordes, es decir, con Skewness por debajo de 0.9 y calidad ortogonal superior a 0.01. Esto es, cumpliendo con los mínimos recomendados de calidad (véase la Figura 2).

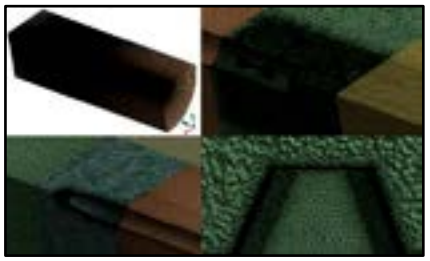


Figura 2

Entre los aspectos de la configuración general de los casos, se puede mencionar:

- Análisis con condición de periodicidad, fluido compresible y adiabático, es decir, no se consideran transferencias de energía por calor hacia o desde el sistema en las fronteras del dominio. La variación de densidad es considerada mediante la ecuación de estado de gases ideales. Simultáneamente es resuelta la ecuación de la energía ya que los cambios de temperatura, presión, velocidad y densidad del fluido se encuentran fuertemente acoplados.
- Método RANS con modelo de turbulencia k-ω SST (Shear Stress Transport).
- Algoritmos de discretización espacial, para problemas de convección difusión, de segundo orden tipo upwind.
- Utilización de esquema pseudo transitorio para mejorar la convergencia de la simulación.

En virtud de lo mencionado, se plantea el análisis fluidodinámico para tres modelos de CAD diferentes (véase la Figura 3), esto es, para aerofrenos intersecando la aleta del lanzador, y otra configuración en dos tamaños de aerofreno entre aletas.

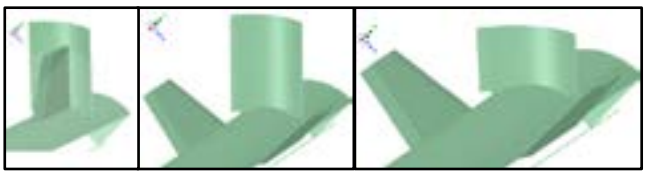


Figura 3.- Diseños de aerofrenos: 1 (izquierda), 2 (centro) y 3 (derecha)

Teniendo presente los diseños, se plantea una vista lateral del dominio fluidodinámico analizado con la nomenclatura de sus respectivas fronteras (véase la Figura 4).



Figura 4.- Named selections

Resultados y discusión

Una vez definidos los modelos y métodos a emplear, es de interés desglosar los resultados para cada aerofreno en cada régimen de vuelo en particular. Con fines prácticos y por una cuestión de tamaño del informe, se expone a continuación los resultados obtenidos en los tres aerofrenos para régimen de vuelo supersónico a Mach 4.

Para el caso del Aerofreno 1 (aerofreno intersecado con la aleta del lanzador) en régimen supersónico a Mach 4 se obtiene un campo de número de Mach sobre el plano de la aleta (véase la Figura 5), un campo de vectores velocidad ubicados sobre un plano de vista en planta y un plano medio de la aleta, esto es, con el fin de identificar las recirculaciones (véase la Figura 6) y un campo de presión y temperatura estáticas sobre las paredes del aerofreno y su entorno (véase la Figura 7).

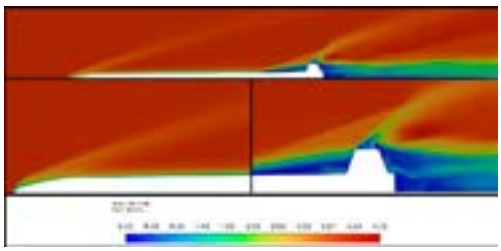


Figura 5

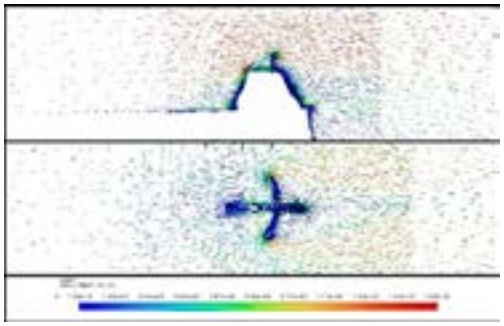


Figura 6

Del campo de mach se observa cómo además de contar con valores máximos globales agua abajo del aerofreno, se cuenta también con la formación de ondas de choque oblicuas débiles en la región de transición entre la cofia y el fuselaje, y en las zonas de recirculación aguas arriba del aerofreno.

Para el campo de vectores de velocidad, se observan máximos locales a los laterales del aerofreno y zonas de recirculación en las inmediaciones de este.

Luego, para el campo estático en las superficies del aerofreno e inmediaciones, nótese que, para el caso de la presión, se tiene el máximo global en el área frontal del aerofreno, como es de esperar.

Sin embargo, el máximo global para el caso de la temperatura se encuentra en la parte posterior del lanzador correspondiente a la bahía de motores. Esto se debe, a una recirculación (véase la Figura 6) y estancamiento del fluido en dicha zona.

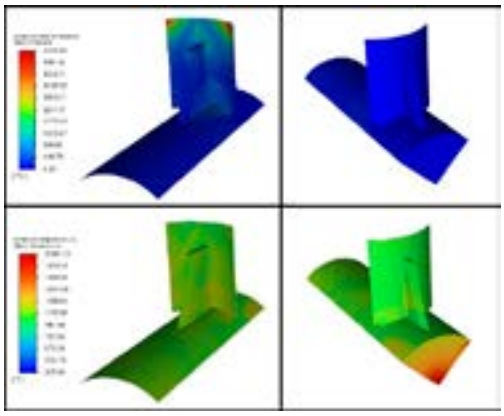


Figura 7

Para el caso de los aerofrenos 2 y 3 en régimen supersónico a Mach 4, en un plano de corte coincidente con el aerofreno es notoria la presencia de ondas de choque oblicuas en la región de la cofia y en un área de recirculación aguas arriba del aerofreno. Mientras que, para un plano de corte coincidente con el plano de simetría de la aleta, se pude observar el cambio en el campo de velocidades debido a la

modificación en la longitud del aerofreno, el cual introduce perturbaciones en el dominio cercano.

Luego, para el campo de vectores velocidad, se puede observar que el flujo se acelera por encima y a los laterales del aerofreno (véase la Figura 8), el cual a su vez cuenta con recirculaciones en su dominio cercano (véase la Figura 10), tanto aguas abajo como aguas arriba a ambos lados de la aleta.

Mientras que los contornos de presión y temperatura estática en las paredes del conjunto lo que demuestra es que, debido a la naturaleza transitoria del flujo, los máximos no son uniformes en toda la cara frontal del aerofreno, llegando a contar con máximos globales de temperatura en caras laterales de la aleta para el caso de menor longitud (véase la Figura 9).

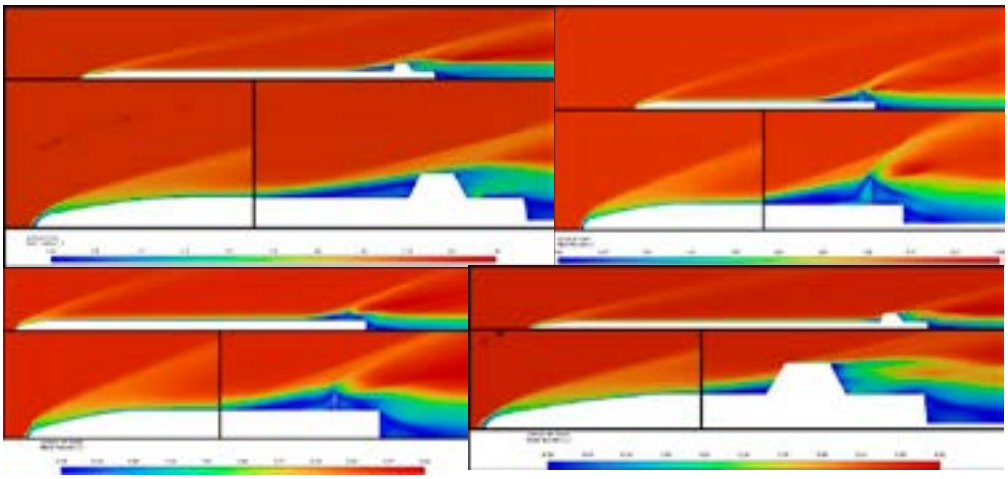


Figura 8

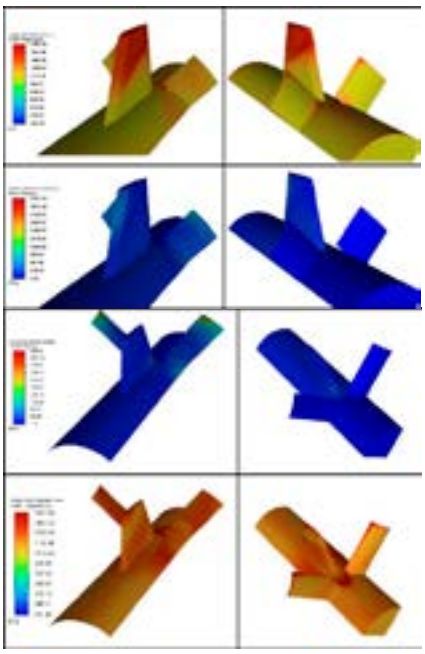


Figura 9

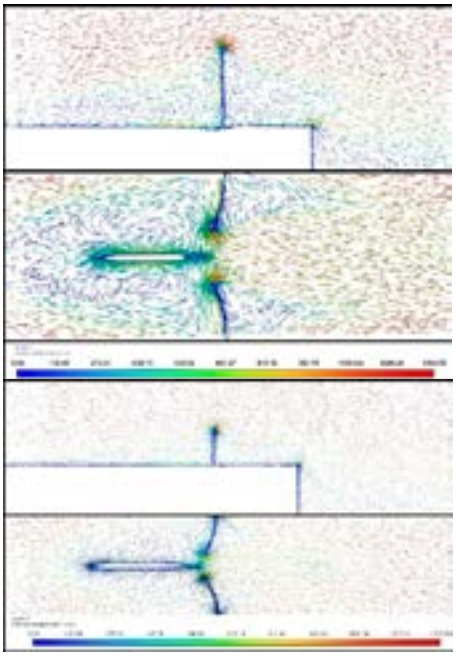


Figura 10

A continuación, en la tabla 1 se presentan los valores de resistencia aerodinámica sobre cada superficie, para los distintos modelos de aerofrenos bajo diferentes números de mach. Téngase en cuenta que, si bien en las simulaciones computacionales se aplicaron condiciones de periodicidad, es decir, analizando ¼ de la geometría (90 grados) en la dirección de revolución, los valores de fuerzas expuestos corresponden al total del vehículo lanzador completo.

Mach	Diseño	F (fuselaje) [N]	F (aerofrenos) [N]	F (aletas) [N]	F (total) [N]	CD (total)
0.5	1	805	6720	-	7525	3.82
	2	703	7190	55	7949	4.03
	3	558	2657	68	3284	1.67
1	1	2032	13080	-	15112	4.92
	2	2041	14380	144	16565	5.40
	3	1764	5500	121	7385	2.41
2	1	3296	21532	-	24828	3.43
	2	3236	21457	-1,8	24691	3.41
	3	3157	7029	505	10691	1.48
4	1	159	706	-	866	1.79
	2	169	624	-3,6	789	1.63
	3	182	142	23	348	0.72

Tabla 1.- Fuerzas de resistencia aerodinámica sobre el vehículo lanzador.

De la Tabla 1, comparando los diseños 1 y 2 (mismas dimensiones), vemos que para Mach 0.5 la fuerza de resistencia del fuselaje en el diseño 1 (805 N) es un 14% mayor respecto a las del diseño 2 (703 N). Estas diferencias disminuyen a números de Mach superiores (Mach 1, 2 y 4), resultando en fuerzas de resistencia del fuselaje similares entre los dos diseños, para cada Mach, respectivamente. Con respecto a las fuerzas de resistencia asociadas a los aerofrenos, se observa que para Mach 0.5 la fuerza del diseño 2 (7190 N) es un 7% mayor que la fuerza de resistencia del diseño 1 (6720 N), y para Mach 1 esta diferencia se incrementa a 10%. Para Mach 2, ambas fuerzas de resistencia de aerofrenos son similares, y para Mach 4 la fuerza de resistencia de aerofrenos del diseño 1 (706 N) pasa a ser un 13% mayor que la fuerza del diseño 2 (624 N).

Con respecto a las fuerzas generadas por las aletas en los diseños 2 y 3, para Mach 0.5 y 1 se observan valores similares, y para Mach 2 y 4 se observan diferencias no despreciables. Se destaca que para el diseño 2, a Mach 2 y Mach 4, los valores de fuerza de resistencia en las aletas pasan a ser levemente negativos (para Mach 2, -1.8 N, y para Mach 4, -3.6 N). Esto último está asociado a que, en estos casos, se forman recirculaciones de gran tamaño en los laterales de las aletas, por lo que la velocidad relativa cercana a la aleta pasa a tener un sentido opuesto a la velocidad de la corriente incidente.

Con respecto a las fuerzas de resistencia de los aerofrenos correspondiente al diseño 3, se observa una disminución notable (con respecto a los demás diseños) para todos los números de Mach, asociada al menor tamaño de estos.

Luego, en la tabla 2 se presentan los valores de C_D de los aerofrenos, adimensionalizando la fuerza de arrastre resultante sobre los 4 aerofrenos (“F(aerofrenos)” según tabla 1) con el área frontal del fuselaje del vehículo lanzador. Téngase en cuenta que el C_D del diseño 1 (aerofreno intersecando aleta) no puede reproducirse en Missile Datcom ya que no es posible ingresar tal geometría, como un dato de entrada.

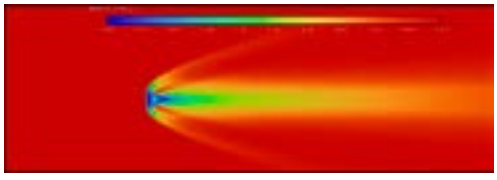


Figura 11

Adicionalmente, se ha realizado el cálculo mediante simulación fluidodinámica computacional de una placa plana aislada en el flujo de aire (véase la Figura 11), es decir, sin tener en cuenta el fuselaje del vehículo lanzador, con el objetivo de evaluar las fuerzas de resistencia aerodinámicas generadas sobre una placa aislada, bajo las mismas condiciones de la corriente libre. Las dimensiones de la placa plana aislada coinciden con las dimensiones de los diseños 1 y 2.

En virtud de lo mencionado, se puede observar que para Mach 0.5, todos los valores de C_D obtenidos son similares, siendo la mayor diferencia de 21% entre el C_D (aerofrenos) del diseño 3, y Missile Datcom.

Mach	Diseño	CD (aerofrenos)	CD (Missile Datcom)	Δ(CD)$_1$ (%)	CD (placa aislada)	Δ(CD)$_2$ (%)
0.5	1	3.41	-	-	3.38	-
	2	3.65	3.53	3.13		4.25
	3	1.35	1.63	-21.31		-
1	1	4.26	-	-	En revisión	-
	2	4.68	6.48	-38.35		*
	3	1.79	3.02	-68.54		-
2	1	2.97	-	-	4.80	-
	2	2.96	5.13	-73.19		6.43
	3	0.97	2.4	-147.64		-
4	1	1.46	-	-	4.56	-
	2	1.29	4.8	-272.57		5.26
	3	0.29	2.25	86.98		-

Tabla 2.- Fuerzas de resistencia aerodinámica generadas por aerofreno y aleta.

Para números de Mach superiores, la diferencia entre C_D (aerofrenos) y C_D (Missile Datcom) incrementa notablemente, encontrándose diferencias de hasta 272% para el caso del diseño 2 a Mach 4. Sin embargo, la diferencia entre C_D (placa aislada) y C_D (Missile Datcom) para Mach 4 es de 5.26%, es decir, prácticamente los C_{Ds} son iguales.

Por lo tanto, si bien el caso a Mach 1 aún se encuentra en revisión, es evidente la concordancia de resultados entre Missile Datcom y la placa plana aislada sin la influencia del fuselaje. Esto último, podría indicar que lo obtenido mediante Missile Datcom no debería ser utilizados como parámetro de referencia en el diseño de los aerofrenos.

Como resultado del análisis cualitativo del campo fluidodinámico, y cuantitativo con respecto a las fuerzas de resistencia aerodinámicas obtenidas, se puede mencionar lo siguiente:

- Los resultados obtenidos por Missile Datcom para flujos transónicos y supersónicos no son representativos.
- En el arrastre del fuselaje, se observa la mayor diferencia para Mach 0.5, siendo esta diferencia de 14% a favor del diseño 1 (805N), respecto al diseño B1 (703 N).
- En el arrastre de los aerofrenos, se observan valores similares entre los diseños 1 y 2, para todos los números de Mach, siendo la mayor diferencia de 13% para Mach 4.
- De los vectores de velocidad, se observa en la mayoría de los casos, estelas no simétricas, lo que podría estar relacionado a la naturaleza no estacionaria del flujo.

Bibliografía

[1] Rosema, Christopher; Doyle, Joshua; Auman, Lamar; Underwood, Mark; Blake, William, “MISSILE DATCOM User’s Manual”, Army Aviation and Missile Research Development, 2011.



CIVILCIVILCIVILCIVILCIVILCIVIL

EVALUACIÓN DE CENIZA VOLANTE LOCAL COMO POSIBLE MATERIAL BASE PARA LA OBTENCIÓN DE CEMENTOS ALCALINOS

Vanesa Tamara Lupori, Matías Roberto Gauna, Claudio Rocco

Unidad de Investigación. y Desarrollo Ingeniería Civil (UIDIC) Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. La Plata – Argentina. 48 y 115 e-mail: uidic@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Las cenizas volantes son materiales de descarte de las centrales termoeléctricas que cumpliendo determinados requisitos físicos y químicos pueden utilizarse como material base para obtener los denominados cementos alcalinos, es por ese motivo que se evaluó la posibilidad de obtener estos cementos en base a una ceniza local, realizando a tal fin la caracterización física, química y mineralógica del material base.

INTRODUCCIÓN

La producción de cemento portland emite grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, el cual es uno de los principales gases de efecto invernadero y está relacionado directamente con la huella de carbono, la necesidad de reducir el consumo de cemento y así disminuir la generación de CO_2 nos lleva a explorar el uso de otros materiales y en particular materiales que resultan ser desperdicios industriales. La ceniza volante es un residuo de la industria termoeléctrica, cuya composición química y porcentaje de material amorfo permite obtener los denominados cementos alcalinos, en base a una activación térmica y fuertemente alcalina, que permite la generación de un producto denominado geopolímero NASH, el cual fragua, endurece y posee buenas propiedades mecánicas comparables a las del cemento.

En el presente trabajo se utilizó una ceniza volante local a la cual se le realizó una serie de caracterizaciones físicas y químicas. Se evaluó su composición mineralógica DRX, su morfología MEB y algunos parámetros físicos importantes como su densidad y finura tanto Blaine como retenido húmedo y la distribución de tamaño de partícula por de difracción láser, y mediante un análisis químico su porcentaje de amorfo.

Se realizaron pruebas de activación alcalina con Na(OH) 8M y 10 M, a una temperatura de 85°C un periodo de 20 Horas en estufa. Se comprobó la presencia del gel NASH por MEB para ambas concentraciones de activador. Se evaluó la resistencia mecánica en las pastas de ceniza y activador a 7 y 28 días desde la activación. También se realizó un reemplazo de la ceniza por cemento portland Normal CPN40. El reemplazo fue de 30% y 40% de la ceniza por cemento. Para estas mezclas también se las activó térmica y alcalinamente y se procedió a evaluar la resistencia mecánica.

Para terminar, se prepararon morteros de ceniza arena y solución activadora de Na(OH) 8My 10M, se utilizó una cantidad fija de arena. La activación se realizó de la misma forma que en pastas. Se procedió a evaluar resistencias mecánicas y a comparar los resultados obtenidos.

PARTE EXPERIMENTAL

En el análisis morfológico de la muestra original en polvo se observa que la ceniza volante presenta una morfología característica en forma de esferas sólidas o rellenas de otras esferas de menor tamaño (plenósferas) Figura 1, en su mayoría las cenizas poseen tamaño menor a 63 micrones, coincidiendo con la distribución de tamaños obtenida por difracción laser. Figura 2

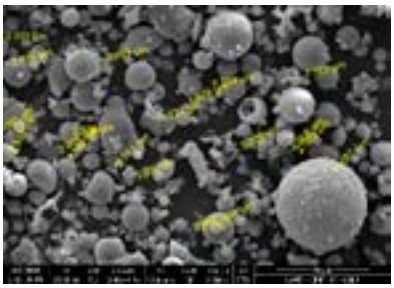


Figura 1

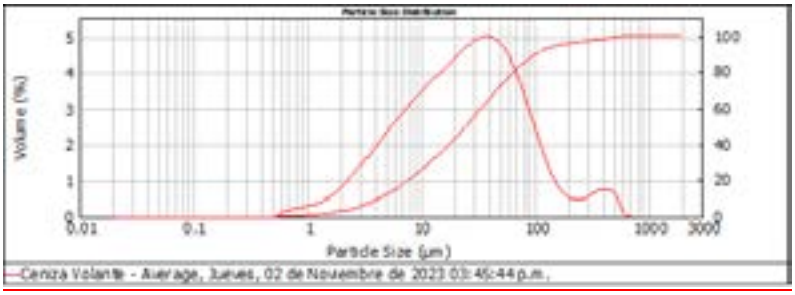


Figura 2

Del ensayo de retenido húmedo IRAM 1621 podemos concluir que alrededor del 81% de las partículas posee tamaño inferior a 75 micrones, lo cual es beneficioso a la hora de llevar a cabo las mezclas con reemplazo de cemento. (alrededor de 50 micrones). La densidad de la Ceniza Volante arrojó un valor de 2,11 g/cm^3 y la Superficie específica Blaine utilizando la norma IRAM 1623 arrojó un valor de S.E. BLAINE: 3887cm^2/g.

La caracterización mineralógica consistió en determinar por un lado el porcentaje de amorfo y/o cristalino de la muestra analizada y por otro, identificar los componentes de la fase cristalina por DRX. Figura 3**.** La fase amorfa es la fase reactiva de la ceniza volante por lo que es de fundamental interés su determinación.

Del análisis de la muestra original por DRX se determinó que las cenizas volantes están formadas principalmente por una fase amorfa (55,6 - 57) % y por una fase cristalina (43 - 44,3) %. Dato que coincide con la determinación con ataque en HF el cual resultó en un valor del 54%. Del análisis de la fase cristalina se determinó por refinamiento Rietveld empleando el método de Le Bail que las ceniza volante está constituida principalmente por las fases minoritarias de cuarzo (27-27.4) %, mullita (15-16.2)% y Hematita (0.8-1)%.

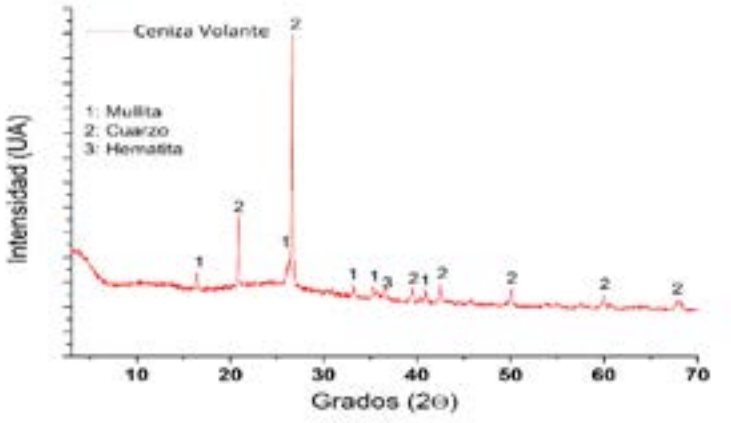


Figura 3

ACTIVACIÓN ALCALINA:
Se realizaron las mezclas de ceniza volante con Na(OH) 8M y Na(OH) 10M, relación a/c: 0,5 y 0,6. Se activaron a 85°C por un periodo de 20 horas. Y se ensayaron sus resistencias mecánicas IRAM 1622 a 7 y 28 días. **Tabla 1**

	Ceniza Volante / Na(OH) - 8M		Ceniza Volante / Na(OH) - 10 M	
	relación : 0,5	relación : 0,6	relación : 0,5	relación : 0,6
CV / gramos	200	200	200	200
Na(OH) / gramos	100	120	100	120

Tabla 1

En la Figura 4 se muestra la caracterización morfológica para relación Na(OH)/ceniza 0,5. La secuencia de aumentos fue de: 100x, 500x, 1000x, 2000x, 2000x y 5000x. Se puede una mayor cantidad de gel NASH, marcadas en amarillo, esferas de ceniza volante donde ha crecido el Gel NASH sobre la superficie de las esferas y también se evidencian huecos dejados por las esferas que se consumieron con la solución de Na(OH).

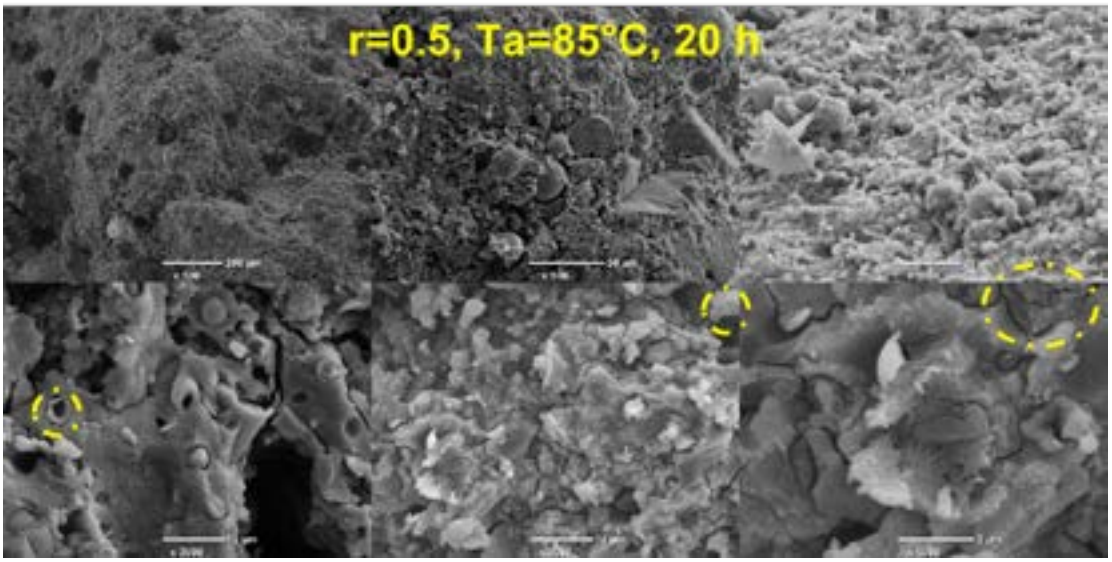


Figura 4

Para la mezcla r=0.6 y 8M se observa una esfera de ceniza volante rellena con una fase que podría ser Mullita, o Herschelite que es una zeolita que se encuentra en cenizas activadas. La resolución de la imagen no permite definir, pero es un producto de la activación

Se determinaron las resistencias mecánicas para las mezclas de la Tabla 7, Ceniza activada a 85°C con Na(OH) 8M y 10M a 7 y 28 días. Tabla 2, Figura 5

RESISTENCIAS Na(OH)/CV de 0,5 Y 0,6 8M Y 10M [MPa]		
r	7 días	28 días
0,5 8M	5,4	4,8
0,5 10 M	7,9	7,4
0,6 8M	2,6	3,2
0,6 10 M	3,7	3,5

Tabla 2



Figura 5

Por último, se realizaron pruebas en morteros (ceniza volante, arena y el medio alcalino) para una relación activador Na(OH)/sólidos de 0,5 y para estas mezclas se evaluó el

desempeño mecánico mediante la prueba de resistencia a 7 y 28 días. Adicionalmente se reemplazó parte de la ceniza volante (30% y 40%) por cemento y se determinó sus resistencias mecánicas.

Para el moldeo de probetas de mortero con solución activadora de Na(OH) 8M Tabla 3 y 10M Tabla 4, se realizaron mezclas con una cantidad de arena fija, en este caso de 80 gramos y una relación masa de Na(OH) / masa de Ceniza Volante de 0.5. (activador/ceniza). Todas las muestras se activaron a 85°C y por un periodo de 20 Horas. Se moldearon según IRAM 1622, y se curaron en cámara húmeda a 20°C, hasta edad de ensayo. **Figura 6**

Mezcla	7 días	28 días
CV PURA - 8M	3,82	7,9
CV - 8M + ARENA	7,6	9,44
CV - 8M + ARENA+ C 30%	19,5	31,47
CV - 8M + ARENA+ C 40%	24,8	30,81

Tabla 3

Mezcla	7 días	28 días
CV PURA - 10M	7,9	7,79
CV - 10M + ARENA	9,9	13,96
CV - 10M + ARENA +C30%	22,8	24,26
CV - 10M + ARENA +C40%	28,2	24,04

Tabla 4

Probetas de mortero en proceso de activación térmica:



Figura 6

Resistencias mecánicas de morteros de ceniza volante activada con a(OH) 8M:

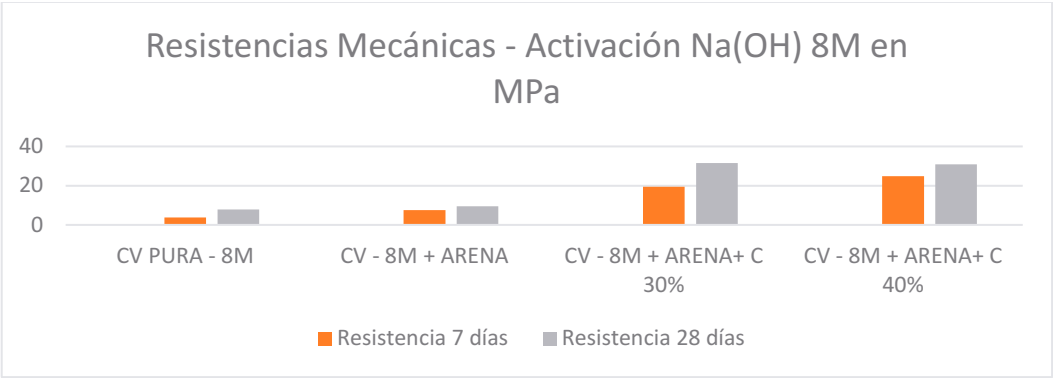


Figura 7

Resistencias mecánicas de morteros de ceniza volante activada con a(OH) 10M:

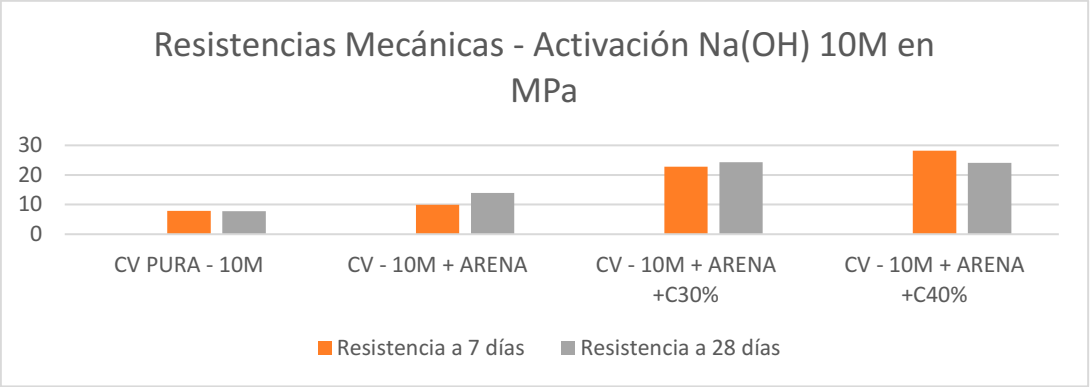


Figura 8

CONCLUSIONES:

- Las cenizas volantes utilizadas en este trabajo y que son de origen local, demuestran capacidad de activación alcalina observada no solo por la evidencia de la presencia del gel NASH que se observa en las imágenes de MEB sino por la resistencia generada en las pastas luego de la activación.
- Los valores de resistencia mecánica alcanzados por la pasta, está dentro del rango esperado según la bibliografía internacional. A pesar de que posee una elevada pérdida por calcinación y que puede generar valores menores en este parámetro. Esa elevada pérdida podría estar dada por la presencia de carbón inquemado.
- El aumento de relación activador a ceniza volante a/c resultó en una disminución de las resistencias mecánicas.
- Las resistencias de mortero resultan ser mayores a la resistencia obtenida en las pastas para una misma concentración molar de activador alcalino y días de curado. La presencia de arena benéfica este parámetro.
- En todos los casos el reemplazo de una parte de la ceniza por cemento contribuyó de forma beneficiosa a la generación de resistencia, lo cual es esperable, aunque las reacciones de hidratación del cemento son exotérmicas y la activación térmica podría afectar ese mecanismo.
- Para los morteros a 7 días la solución de Na(OH) 10M parece tener el mejor desempeño a 28 días, esto se invierte y el mejor desempeño se da para morteros con 30% de reemplazo por cemento y la como solución activadora Na(OH) 8M.

Referencias

[1] Ana Fernández-Jiménez, Angel Palomo. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 No 3, Diciembre de 2009

[2] Torres-Carrasco, M. y Puertas, F. La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Rev. ing. constr.* [online]. 2017, vol.32, n.2

[3] Y.H.Mugahed Amran, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar: Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production Volume 251, 1 April 2020, 119679.

AVANCES EN EL CONTROL DE CALIDAD DE HRF MEDIANTE EL USO DE ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Monetti Diego H.[1], Gómez Enzo D.[2], Vázquez Damian R.[2] y Duffo Gustavo S.[2].

[1]Facultad de Ingeniería UNLP$_1$, Calle 115 y 48, La Plata (1900), Pcia. de Buenos Aires,
[2]Comisión Nacional de Energía Atómica
dmonetti@ing.unlp.edu.ar;

INTRODUCCIÓN

Ante el creciente empleo de la utilización de fibras para el refuerzo de hormigones (HRF), y en particular en lo referente a elementos pre moldeados, se manifiesta la necesidad de implementación de controles de calidad que permitan evaluar la correcta distribución de las fibras en todo el volumen de la pieza, y resultan mucho más útiles y deseables si se desarrollan mediante métodos no destructivos.

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS por su sigla en inglés) es una técnica electroquímica que permite medir la resistencia a la circulación de una corriente alterna (impedancia) generada por la variación sinusoidal de potencial (PEIS) o corriente (GEIS). Al tratarse de una espectroscopia, la técnica varia la frecuencia de la señal de ingreso y registra para cada frecuencia utilizada, una impedancia que tiene una componente real (resistiva) y una componente imaginaria (reactiva). Una matriz cementicia puede actuar como el electrolito de una celda electroquímica si se utilizan electrodos metálicos en contacto con la matriz [1]. La estructura de poros, el contenido y conductividad de la solución de poros y la presencia de cualquier componente conductor, como las fibras de acero, influyen en la circulación de corrientes a través del compuesto. En investigaciones recientes [2,3], se ejecutaron mediciones de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) sobre diferentes HRF utilizando electrodos embebidos y se analizó el registro del efecto de la incorporación de fibras de acero sobre el comportamiento eléctrico del hormigón. Se observó que los diagramas de Nyquist muestran tres características en su morfología que pueden ser utilizadas para evaluar la presencia de fibras tales como la reducción de la impedancia inicial asociada al electrolito, el desarrollo de un semicírculo capacitivo de frecuencias intermedias asociado a la presencia de fibras y el desarrollo de la impedancia del electrodo a bajas frecuencias con impacto mínimo por la presencia de fibras. Al mismo tiempo, se ajustaron las mediciones ejecutadas sobre HRF a un circuito equivalente propuesto para cuantificar el valor de sus componentes. Se comprobó que los parámetros eléctricos asociables a la presencia de fibras también se ven influenciadas por la presencia de humedad y la distancia entre electrodos de medición siendo necesario establecer una metodología que permita independizar los parámetros obtenidos de dichas condiciones.

El presente estudio es la continuación de los resultados obtenidos a partir de la colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI-UNLP) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) cuyo objetivo general fue evaluar el grado de sensibilidad de la EIS para detectar zonas con segregación de fibras dentro de la masa de hormigón en búsqueda de un potencial método no destructivo aplicable al desarrollo de equipos de uso industrial que permitan evaluar la dosificación y dispersión de fibras. Este trabajo presenta una metodología que posibilita independizar los valores de los parámetros eléctricos de interés de aspectos geométricos mediante la obtención de coeficientes geométricos que permiten transformar valores de resistencia en resistividad, utilizando celdas electroquímicas con soluciones de resistividad conocida. A su vez, en los trabajos

previos, mediante relaciones entre valores de resistividad seleccionados de diagramas de EIS, se propuso una metodología para independizar dichos parámetros del estado de humedad. Los resultados muestran que se pueden obtener factores indicadores de distribución de fibras, a partir de relaciones de resistividades, con buena repetitividad en los resultados.

METODOLOGIA

Para poder independizar los valores de los parámetros eléctricos de interés de aspectos geométricos, se planteó la obtención de factores que permitieran transformar valores de resistencia eléctrica en resistividad. A tal fin, se fabricó una celda de vidrio de 150x600x600, cuyo llenado se ejecutó hasta los 130 mm de altura para emular la geometría de las vigas de hormigón utilizadas en los estudios previos. A su vez, se reprodujo la ubicación de los electrodos de instrumentación utilizados en las piezas prismáticas de hormigón, y remplazando la mezcla cementicia por múltiples soluciones con conductividad conocida, se midieron , resistencias eléctricas que permitieran establecer una curva de correlación entre resistencia y resistividad para cada configuración de medición utilizada en el programa experimental. A partir de las correlaciones obtenidas se establecieron coeficientes geométricos que permiten independizar las mediciones de los aspectos geométricos.

Al igual que se hizo oportunamente sobre las probetas de hormigón, se contemplaron ocho (8) configuraciones de medición, detalladas en la Tabla 1, resultantes de la combinación de dos (2) configuraciones de conexión, sistema de dos (C2) y tres electrodos (C3), y distintas características geométricas de los electrodos (distancia y forma). Sobre estas 8 configuraciones se ejecutaron Espectroscopias de impedancia electroquímicas Potenciales (PEIS), de 10 mV de amplitud y barriendo un rango de frecuencias entre 10 kHz y 10 Hz, para medir resistencia eléctrica sobre cada solución.

Tabla 1: Descripción de configuraciones geométricas y de conexión.

Configuraciones de conexión			
C2	Sistema de dos electrodos. CE y RE conectados a un mismo electrodo.		
C3	Sistema de tres electrodos. CE y RE conectados a electrodos independientes.		
Configuraciones geométricas			
	C3EB	C2EB	C2EP
Distancia WE-RE	30 mm	-	-
	81 mm	70 mm	-
	106 mm	150 mm	150 mm
	306 mm	300 mm	-

Considerando la norma ASTM 1125 [4] como referencia, se utilizaron 4 soluciones de Cloruro de potación (KCl), de normalidad y resistividad conocida a 23°C, en remplazo del material cementicio. Sumergiendo el sistema de electrodos en cada solución, se ejecutaron los ensayos PEIS bajo cada configuración antes mencionada. Para la preparación de las soluciones se utilizó KCl de calidad analítica y agua destilada de calidad mili-Q. La Tabla 2 detallalas características de las soluciones utilizadas. Para verificar que los valores de resistividad asignados a cada solución se cumplieran, y como datos complementarios para la correlación, se midió la conductividad de la solución, previa y posteriormente a la ejecución de las mediciones EIS.

Tabla 2: Soluciones – Dosificación en peso de los componentes utilizados.

Id. Solución	Tipo de solución	Preparación	Conductividad Teórica [5] [µS/cm^2]	Conductividad Medida (23 ± 0,5 °C) [µS/cm^2]
S01	KCl 0,1 N	7,436 gr de KCl por cada Litro de solución	13000	13370
S02	KCl 0,01 N	100 ml de S01 por cada litro de solución	1300	1387
S03	KCl 0,001 N	100 ml de S02 por cada litro de solución	130	138
S04	KCl 0,0001 N	100 ml de S03 por cada litro de solución	13	14,3

Una vez efectuadas las mediciones mediante EIS sobre la celda de carga para las todas las configuraciones planteadas y sobre cada una de las soluciones adoptadas, se graficaron los resultados y se procedió a la determinación de la relación entre resistividad y resistencia eléctrica para cada configuración. A tal efecto, se conformaron las curvas resistencia (R) vs. resistividad (ρ), y a partir de las mismas se obtuvo la ecuación que relaciona ambas y de este modo permite traducir las resistencias registradas mediante EIS sobre las probetas de hormigón a resistividades y de este modo independizar los registros obtenidos de la geometría. La ecuación obtenida es $\rho=K_F \cdot R$ siendo ρ la resistividad, R las resistencias obtenidas al aplicar PEIS sobre los HRF y K_F el coeficiente geométrico que surge del análisis de las curvas antes mencionado. La Figura 1, muestra un esquema de la secuencia de tratamiento de datos.

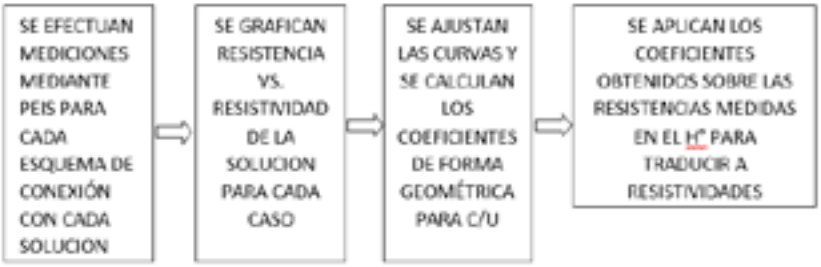


Figura 1: Esquema de la secuencia de tratamiento de datos realizados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los resultados de resistencia obtenidos en relación con cada valor de resistividad considerado y para cada esquema de conexión adoptado.

Tabla 3: Resistividad de las soluciones de KCl empleadas y resistencias asociadas obtenidas mediante EIS para cada caso.

Id. Solución	Resistividad Teórica [Ω.cm]	Resistividad Medida [Ω.cm]	Resistencia [Ω]							
			C3EB-L1	C3EB-L2	C3EB-L3	C3EB-L4	C2EB-L1	C2EB-L2	C2EB-L3	C2EP-L2
S01	76,9	74,8	3,0	5,3	9,0	15,6	8,2	11,8	18,4	10,7
S02	769,2	721,0	28,1	50,3	86,6	149,3	77,5	113,0	175,5	92,0
S03	7692,3	7246,4	277,6	504,6	873,0	1497,1	776,6	1135,9	1760,6	932,6
S04	76923,1	69930,1	2789,1	4800,4	8645,4	14772,5	7611,1	11222,7	17426,5	9006,6

Aplicando la metodología mencionada previamente se obtuvieron, para cada configuración de conexiones planteada, las curvas que vinculan resistencia y resistividad. En la Figura 2

se presentan, a modo de ejemplo, los gráficos obtenidos para la configuración C3EB-106 y C2EB-70. Por su parte en la Tabla 4 se presentan los coeficientes geométricos que correlaciones resistencia y resistividad, obtenidos para cada una de las ocho configuraciones evaluadas.

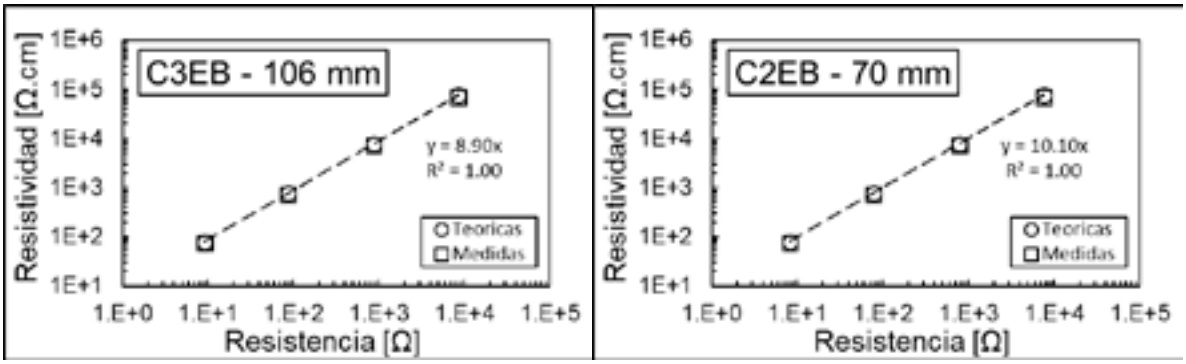


Figura 2: Relación entre resistividad y resistencia para las configuraciones C3EB-106 y C2EB -70.

Tabla 4: Coeficientes geométricos obtenidos para las ocho configuraciones evaluadas.

Coeficiente geométrico (K_F)	
C3EB - 30 mm	27,58
C3EB - 81 mm	16,02
C3EB - 106 mm	8,90
C3EB - 306 mm	5,21
C2EB - 70 mm	10,10
C2EB - 150 mm	6,85
C2EB - 300 mm	4,41
C2EP - 150 mm	8,54

Aplicando la relación obtenida a partir de los ensayos sobre la celda electrostática presentados, a los datos de resistencias obtenidos en estudios previos [5],(ver Tabla 5) se obtuvieron los gráficos que se presentan en la Figura 3 en los que se muestra la variación de las resistividades medias calculadas para cada hormigón con diferentes contenidos de fibras tanto a partir de los valores de la resistencia R_H como de los de la resistencia R_F, siendo estas resistencias correspondientes a la resistencia inicial asociada al electrolito, y la resistencia asociada a la presencia de fibras respectivamente que surgen de la adopción de un circuito equivalente tipo “Randles” tendiente a emular la respuesta eléctrica de los HRF evaluados y para el cual se calcularon en cada caso los valores de los componentes adoptados a partir de las mediciones efectuadas mediante PEIS sobre las probetas de hormigón.

Tabla 5: Resistencias R_H y R_F obtenidas a partir de ensayos PEIS sobre HRF correspondientes estudios previos [5]

		R_H				R_F			
Configuración	**Distancia [mm]**	**HC**	**HRF20**	**HRF40**	**HRF60**	**HC**	**HRF20**	**HRF40**	**HRF60**
C3EB	30	170	113	82	84	103	172	227	253
	81	388	187	144	152	132	265	446	498
	166	779	379	247	221	161	379	817	835
	306	1213	520	360	335	216	660	1159	1197
C2EB	70	562	305	230	239	332	439	778	754
	150	919	485	331	298	381	526	1104	964
	300	1427	642	469	439	388	814	1456	1505
C2EP	150	691	386	302	236	235	473	825	779

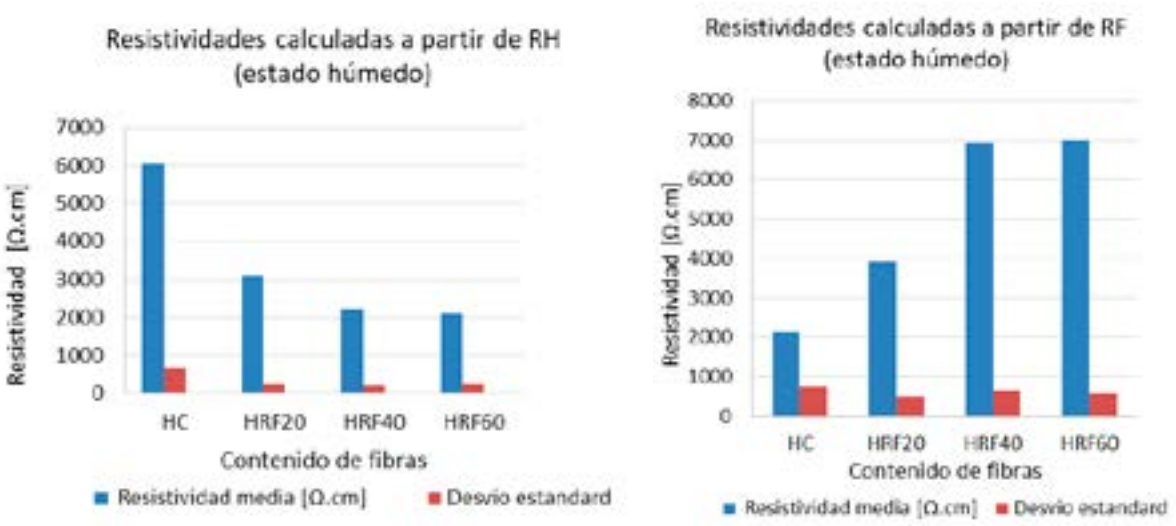


Figura 3 – Valores de resistividades calculados a partir de las resistencias RH y RF medidas sobre cada hormigón evaluado

Al observar los valores de resistividades obtenidos para cada hormigón se distinguen dos aspectos principales a considerar:

- las resistividades obtenidas para cada hormigón son consistentes para cada uno de los esquemas de conexión utilizados y por ende representativas del comportamiento eléctrico del hormigón considerado. En este sentido, los desvíos estándar calculados se encuentran en el entorno del 10% respecto a la media de resistividades.
- Por otro lado se observa que las resistividades obtenidas son sensibles al contenido de fibras por lo cual serían de utilidad para la evaluación de variaciones en el mismo independizando las evaluaciones del esquema de medición utilizado. Complementariamente se remarca que mediante el análisis de las resistividades se hace más evidente la influencia de la presencia de fibras sobre la resistividad del electrolito.

CONCLUSIONES

Mediante la utilización de celdas electroquímicas con soluciones de resistividad conocida se propuso una metodología para independizar los valores de los parámetros eléctricos de interés obtenidos mediante EIS sobre HRF de los aspectos geométricos mediante la obtención de factores que permiten transformar valores de resistencia en resistividad.

Los resultados muestran que:

- Los valores de resistividades obtenidos para cada configuración de conexión sobre un mismo hormigón son consistentes entre sí haciendo válida la utilización de la resistividad media como representación de cada hormigón analizado.
- Las resistividades obtenidas tanto a partir de las resistencias asociadas al electrolito como a las asociadas a la presencia de fibras son sensibles al contenido de fibras de la mezcla.
- Se pueden obtener factores indicadores de distribución de fibras, a partir de relaciones de resistividades, con buena repetitividad en los resultados independientemente del esquema de conexión utilizado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Duffo, G. & Farina, S., “La corrosión de estructuras de hormigón armado”, Editorial Académica Española, (2016).

[2] Gómez, E.; Monetti, D.; Carricondo, J.; Vázquez, D.; Zerbino, R. & Duffo, G., “Caracterización de hormigones reforzados con fibras de acero utilizando espectroscopia de impedancia electroquímica”, Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN, (2024).

[3] Gómez, E.; Monetti, D.; Carricondo, J.; Vázquez, D.; Zerbino, R. & Duffo, G., “Evaluación de técnica eléctrica no destructiva para la detección de fibras de acero en hormigón”, XI Congreso internacional y XXV reunión técnica de la AATH, (2024).

[4] ASTM D 1125 – 95 (2005),” Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water”,

[5] Gomez, E., Monetti, D.; Vazquez, R., Zerbino, R.; Duffó, G., “Detección de fibras de acero en hormigones mediante técnica eléctrica no destructiva “, Revista Hormigón 67, (marzo 2025-agosto 2025) 35–49

MEZCLA ASFALTICA DE ALTO DESEMPEÑO PARA PAVIMENTOS A PARTIR DE ALTAS TASAS DE RECICLADO DE PAVIMENTOS Y UN ASFALTO ALTAMENTE MODIFICADO.

Morea Francisco, Arrizabalaga Gastón, Mampazo Elisa, Fracassi Luciana, Daguerre Lisandro, Larsen Diego, Williams Eduardo.

UIDIC- Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
francisco.morea@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La incorporación y reutilización de pavimento asfáltico recuperado (RAP) es fundamental por motivos ambientales y económicos en la construcción y rehabilitación de pavimentos asfálticos, que cuentan con recursos limitados. El RAP consta de ligante asfáltico y agregados pétreos de calidad que pueden y deben usarse nuevamente en el diseño de una nueva mezcla asfáltica con ventajas económicas y ambientales. Además, el uso de asfaltos modificados para lograr mezclas de alto rendimiento es cada vez más común en la industria de pavimentos. Entre estos, ha surgido el Asfalto Altamente Modificado (HiMA), que permite mezclas de alto rendimiento, espesores de capa de pavimento reducidos y mayor durabilidad de la mezcla, entre otros beneficios. Considerar la sinergia de combinar altas tasas de RAP con el ligante asfáltico HiMA es un campo de estudio muy interesante para obtener mezclas de alto rendimiento que contribuyan a la sostenibilidad. En este trabajo se estudió la incorporación de un RAP convencional muy envejecido en altos porcentajes a una mezcla asfáltica densa graduada, en la que se utilizó HiMA como ligante virgen. Se caracterizó el comportamiento frente a diferentes modos de falla y se comparó con dos mezclas control elaboradas con áridos vírgenes con dos diferentes tipos de ligantes, convencional y modificado con polímeros. Se encontró que la mezcla con altas tasas de RAP y HiMA como ligante asfáltico virgen (HiMA-RAP) muestra un buen desempeño comparable con la mezcla asfáltica de control con asfalto modificado con polímeros en cuanto a ahuellamiento, daño por humedad y módulo dinámico, mejorando el desempeño de la mezcla asfáltica de control. con asfalto convencional. Por su parte la respuesta a fatiga de la mezcla HiMA-RAP fue comparable a la mezcla asfáltica modificada con polímeros y mejoró la respuesta a la fatiga con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Palabras Claves: Reciclado de pavimentos (RAP), Asfalto Altamente Modificado (HiMA), desempeño.

Introducción

En la construcción y rehabilitación de pavimentos asfálticos se utilizan grandes cantidades de recursos, más específicamente áridos y asfalto. Estos recursos son limitados por lo tanto es primordial incrementar la durabilidad de las mezclas asfálticas o incorporar nuevos materiales para mejorar el desempeño. Por su naturaleza, las mezclas asfálticas tienen un comportamiento visco-elástico a temperaturas medias a altas del pavimento (se fatigan y son deformables) y a bajas temperaturas como un sólido elástico de comportamiento frágil pudiendo fisurarse. Las actuales condiciones climáticas tan extremas entre bajas y altas temperaturas requieren nuevos y mejores materiales para afrontar estos problemas.
Otro aspecto importante a la hora de disminuir las cantidades recursos naturales vírgenes usados en mezclas asfálticas es la incorporación y reutilización de mezclas asfálticas que terminaron su vida útil y se reciclan, conocidas en la vialidad como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). La utilización de RAP se centra dentro de los requisitos de soluciones amigables con el medioambiente debido a que el mismo es ecológico y rentable. Al agregar RAP a la

mezcla, se reduce el impacto ambiental en la producción en un 23% [1] esta reducción de costo está asociada con una reducción del uso de material asfáltico El material agregado virgen de calidad es cada vez más difícil de encontrar y comprar, por lo tanto, el uso de RAP permite compensar costos [2].
La incorporación de RAP a mezclas asfálticas, generalmente se limita a un rango relativamente bajo (entre 10 y 15 %). Este porcentaje en general es limitado debido a las dificultades para mezclar el mismo con los materiales vírgenes [3], sin un aumento excesivo de las temperaturas de mezcla. Respecto a la incorporación de altas tasas de RAP a las mezclas asfálticas se presentan diversos inconvenientes. El RAP al ser un material envejecido es más rígido. Este aumento de rigidez aumenta la fragilidad de la mezcla y la probabilidad de rotura frágil a bajas temperaturas. Además, al momento de calentarse el RAP hay que considerar que este material ya contiene asfalto, por lo que no puede ser calentado de la misma manera que los agregados para no dañar sus propiedades. Para poder incorporar mayores tasas de RAP se pueden utilizar técnicas de mezclas templadas y tibias [4]. Además, la rigidez de la mezcla con RAP es generalmente mayor, lo que puede llevar a un desempeño a la fisuración insuficiente [5]. Por otra parte, se ha encontrado que las mezclas nuevas elaboradas con RAP convencionales que se desarrollan con altas tasas de RAP son potencialmente más susceptibles de sufrir daño por humedad [6].
Para subsanar estas potenciales problemáticas mostradas antes una solución es la de diseñar mezclas de altas prestaciones con asfaltos Altamente Modificados (AM conocidos como HiMA, Highly Modified Asphalt). Estos permiten mezclas de altas prestaciones, reducir espesores de capas de pavimentos y mejorar la durabilidad de las mezclas.
Resulta interesante pensar en la sinergia de utilización de asfaltos altamente modificados en mezclas con altas tasas de RAP en post de obtener mezclas de alto desempeño comparables a mezclas con agregados vírgenes con asfaltos modificados con polímeros. En este trabajo se estudió la incorporación de altas tasas de un RAP convencional a una mezcla densa tradicional en la que se utilizó como ligante virgen un asfalto altamente modificado HiMA, en busca de mejorar y optimizar el desempeño de esta mezcla.

Parte Experimental

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento de una mezcla con la incorporación de altas tasas de un RAP convencional con la utilización como ligante virgen de un asfalto altamente modificado con polímeros (AM) con la idea de mejorar y optimizar el desempeño de esta mezcla. Tomando como parámetros de comparación se estudiaron dos mezclas densas elaboradas con agregados vírgenes y ligantes convencional (CA30 IRAM IAPG 6835) y otra con asfalto modificado con polímero (AM3 IRAM IAPG 6596) respectivamente. Por lo tanto, se estudiaron tres mezclas que de aquí en adelante se denominarán de la siguiente manera:

- Mezcla densa con agregados vírgenes y un ligante convencional CA30 (Control CA30)
- Mezcla densa con agregados vírgenes y un ligante Modificado con polímeros (Control AM3)
- Mezcla densa con 40 % de RAP y como ligante virgen un asfalto Altamente Modificado (AM-RAP)

Materiales y Mezclas

Para el estudio planteado, se partirá de un Concreto Asfaltico en Caliente Denso de tamaño máximo 19 mm (CAC D19 del pliego argentino DNV 2017 [7]), elaborada con agregados vírgenes del tipo granítico y un asfalto convencional del tipo CA-30 (IRAM IAPG 6835). Asimismo, considerando los objetivos planteados, se estudió una leve variante de esta mezcla de control elaborada con un ligante modificado con polímeros del tipo AM3 (IRAM IAPG 6596). En Argentina las mezclas elaboradas con AM3 son en general utilizados para elaborar mezclas de alto desempeño, es decir un estándar de máxima. En la Tabla 1 se vuelca la

composición de estas mezclas denominadas de aquí en adelante como Control CA30 y Control AM3.

Tabla 1. Proporciones de las mezclas estudiadas

	Control CA30	Control AM3	AM-RAP
Agregado		**% en mezcla**	
Agregado (6-20 mm)	42,8	45,8	37,2
Agregado (0-6 mm)	50,5	48,7	19,1
Cal	1,9	1,0	1,0
RAP Grueso	-	-	26,7
RAP Fino	-	-	11,5
Asfalto virgen	4,8	4,5	2,7
asfalto RAP (Grueso-Fino)	-	-	1,8

A partir de esta granulometría base se analizó y cambio parte de los agregados vírgenes con un RAP convencional en una tasa de 40 % que se separó en sus fracciones fina y gruesa (12 % y 28 % respectivamente). Se adecuó la gradación granulométrica de la mezcla con RAP de manera que resulte similar a las mezclas de control y se ajuste a lo prescripto en el pliego de especificaciones argentino para mezclas con RAP [8]. De esta manera las mezclas se encuentran en un plano de comparación similar para comparar el desempeño, ver Tabla 1.

Plan de ensayos

Las mezclas en estudio fueron caracterizadas comparativamente desde el punto de vista del desempeño a partir de una serie de ensayos tradicionales en el medio vial relacionados con los diferentes modos de falla que se suscitan en los pavimentos; ahuellamiento, fisuración, fatiga y daño por humedad.

Resultados

El objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento de una mezcla con la incorporación de altas tasas de un RAP convencional con la utilización como ligante virgen de un asfalto Altamente Modificado con polímeros (AM conocido más comúnmente como HiMA) con la idea de mejorar y optimizar el desempeño de esta mezcla. En la Tabla 2 se observa las principales características volumétricas de las mezclas en estudio. Las mezclas cumplen los requerimientos de las especificaciones para mezclas asfálticas densas en Calientes del pliego de Vialidad Nacional Argentina en su versión 2017 [8]. Es de destacar que, en la mezcla con material reciclado, el 40 % de RAP incorporado aporta un 1,8% de asfalto y solamente un 2,7 % de asfalto corresponde al AM. La mezcla AM-RAP se pudo mezclar y compactar sin mayores inconvenientes a temperaturas de mezclado y compactación tradicionales para mezclas con asfaltos modificados con polímeros (165-160 ºC).

Tabla 2. Propiedades volumétricas de las mezclas de estudio.

Propiedad		CA30	AM3	AM-RAP	Limites*
Asfalto Virgen	(%)	4,8	4,5	2,7	
Asfalto del RAP	(%)	-	-	1,8	
Densidad Rice	(gr/cm^3)	2,514	2,521	2,534	
Densidad	(gr/cm^3)	2,408	2,42	2,434	
Vacíos	(%)	4,2	4,0	3,9	3-5 %
VAM	(%)	15,8	14,9	14,9	> 14%
VOB	(%)	73,3	73,1	73,7	65-75

*Pliego Mezclas densas 2017 Dirección Nacional de Vialidad Argentina (DNV 2017) [7,8]

En la Figura 1 se vuelcan las curvas maestras de Modulo Dinámico (Ed) a la temperatura de referencia T_{ref} = 20 ºC de las diferentes mezclas estudiadas. Se observa en la figura que la mezcla con reciclado y asfalto altamente modificado (AM-RAP) presenta valores de modulo mayores a las mezclas de Control (CA-30 y AM3 con agregados vírgenes) en todo el rango

de frecuencias con una tendencia a valores similares de E en altas frecuencias. Los mayores valores de modulo a bajas frecuencias le confiere a la mezcla un potencial mejor comportamiento frente a deformaciones permanentes. Este mayor modulo dinámico se debe en parte al RAP, pero también debido al asfalto Altamente Modificado (AM) que de por si brinda a las mezclas elaboradas con ellos altos módulos dinámicos como se observa en la literatura en el trabajo de Habbouche et al. [9]. En consecuencia, las mezclas diseñadas con asfaltos AM se pueden materializar con menores espesores en el pavimento como se ha visto en el trabajo de Gaspar, Vasconcelos, da Silva y Bernucci [10].

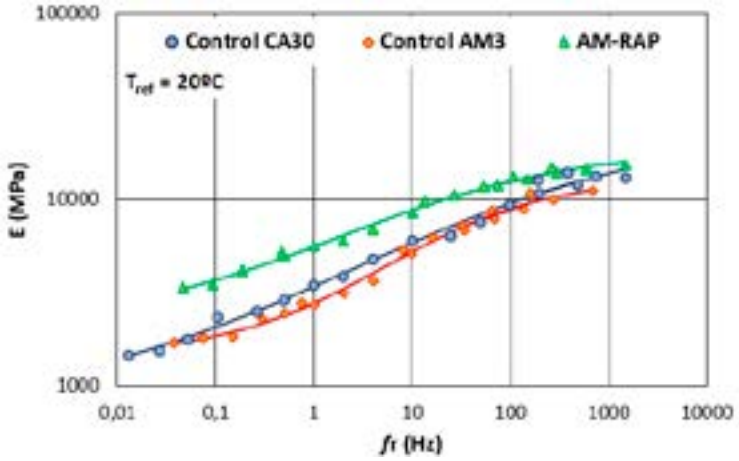


Figura 1. Curvas Maestras de Modulo dinámico de las mezclas.

En la Figura 2 se muestran los resultados de los ensayos de ahuellamiento en el Wheel Tracking. Se observa que la mezcla con AM-RAP presenta un comportamiento análogo a la mezcla de control AM3, estipulada aquí como estándar de máxima en desempeño con agregados y asfaltos vírgenes. Es de destacar que la mezcla es adecuada para su utilización en los mayores niveles de tránsito especificados en Argentina para capas de base y rodamiento [8]. Se observa que la mezcla con AM-RAP mejora ampliamente el desempeño al ahuellamiento respecto de la mezcla de control CA30 y recordando que tiene un 40 % de material reciclado y solo una adición de 2,7 % de asfalto virgen AM.

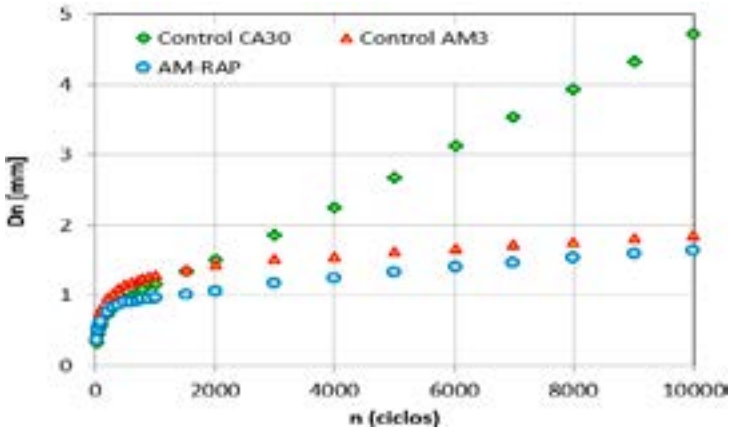


Figura 2. Resultados ensayos de ahuellamiento – Wheel tracking

En la Figura 3 se vuelcan los resultados obtenidos de sensibilidad al agua en el ensayo de Hamburgo (ASSTHO T 324) de las mezclas estudiadas. Se observa que la mezcla de Control CA30 presenta grandes deformaciones al final del ensayo, superiores a los 15 mm, e inclusive muestra un leve punto de inflexión cercano a las 15000 pasadas. Este punto de inflexión se condice con el descubrimiento de la película de ligante de los agregados como se observa en la imagen de la Figura 3-Derecha para esta mezcla. Por su parte se observa que la mezcla de Control AM3 presenta un muy buen desempeño en el ensayo con bajo niveles de deformaciones, sin punto de inflexión y no se observaron perdida de adherencia entre el

ligante y los agregados. Para la mezcla con material reciclado AM-RAP se ve que esta mezcla presenta un muy comportamiento y análogo al de la mezcla Control AM3 a pesar de la alta tasa de RAP utilizada del 40 %. No se observó en esta mezcla desprendimientos de la película de ligante de los agregados como se ve en la imagen de la Figura 3-Derecha y las deformaciones al final del ensayo son del mismo orden que la mezcla Control AM3.

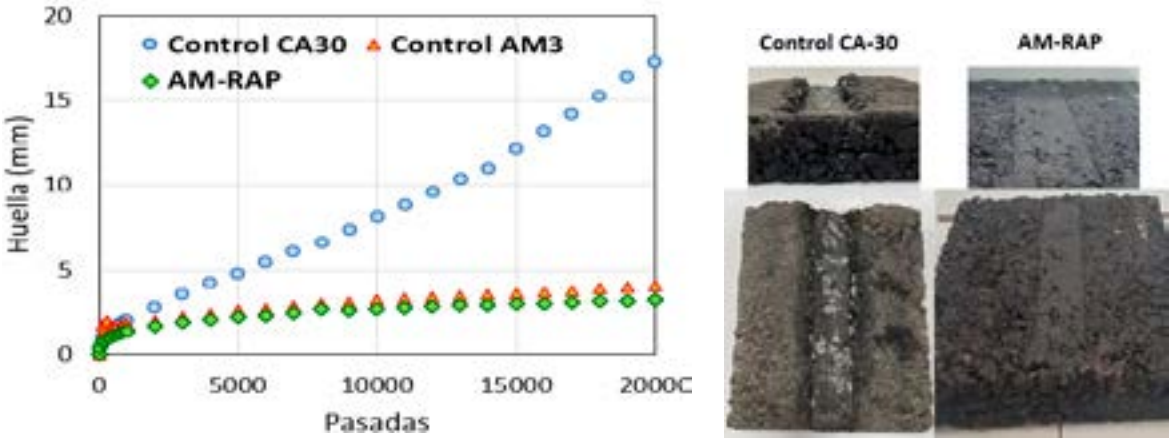


Figura 3. Izquierda: Resultados ensayos de Hamburgo. Derecha: imágenes de probetas de dos de las mezclas estudiadas después de ensayadas.

En la Figura 4 se vuelcan las leyes de fatiga elaboradas para las tres mezclas en estudio. Se observa en primera instancia que la mezcla con material reciclado y ligante altamente modificado mejora el comportamiento de la mezcla de Control CA30 con un corrimiento de la ley de fatiga a mayores ciclos de falla. Si tomaramos en cuenta el criterio e_6 (deformación admisible para soportar un millon de ciclos), vemos que la mezcla AM-RAP presenta un valor de e_6 mayor del de la mezcla de control CA30, un 35 % mayor. Por otro lado, se observa en la figura 4 que la mezcla AM-RAP no alcanza el desempeño de la mezcla Control AM3. Aquí se pone de manifiesto como la tasa de material reciclado utilizada del 40 % puede estar jugando su parte al rigidizar la mezcla. Si bien el ligante AM mejora el desempeño a fatiga no alcanza los niveles de la mezcla de control AM3. A favor de la mezcla AM-RAP es importante recordar que aquí tenemos en juego que la mezcla con AM3 es todo material virgen en un 4,5 % (solo ha sufrido un envejecimiento en su elaboración). Por su parte, la mezcla AM-RAP el ligante AM es solo un 2,7 % del total mientras que el resto, 1,8 %, es el ligante del RAP bastante envejecido, ver Tabla 3. No era el objetivo de este estudio pero un agente rejuvenecedor podría mejorar el desempeño a fatiga de la mezcla con RAP.

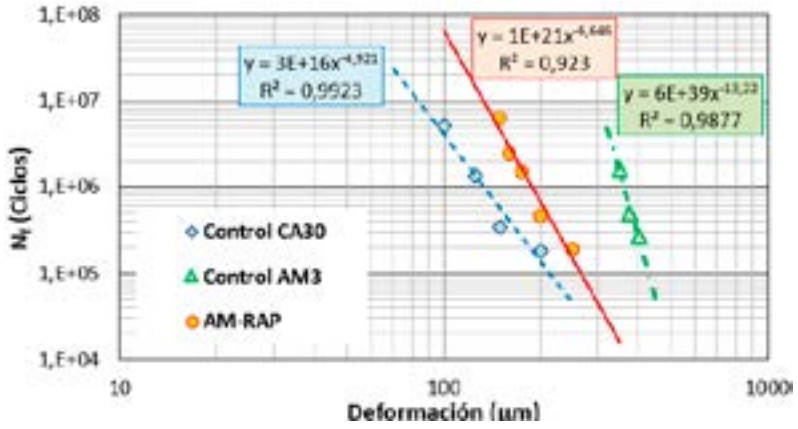


Figura 4. Leyes de fatiga de las mezclas estudiadas.

Conclusiones

Este trabajo explora el diseño de una mezcla con la incorporación de altas tasas de un RAP convencional en la que se utilizó como ligante virgen un asfalto altamente modificado en busca de mejorar sus características de comportamiento. A continuación, se vuelcan las principales conclusiones encontradas.

La mezcla con material reciclado y asfalto altamente modificado (AM) se pudo mezclar y compactar sin inconvenientes a temperaturas de mezclado y compactación tradicionales para mezclas con asfaltos modificados con polímeros (165-160 ºC). La mezcla cumplió los requerimientos de las especificaciones para mezclas asfálticas densas en Calientes con la incorporación de RAP del pliego de Vialidad Nacional Argentina en su versión 2017. Es de destacar que, en la mezcla con material reciclado, el 40 % de RAP incorporado aporta un 1,8% de asfalto y solamente un 2,7 % de asfalto corresponde al AM.

En carácter general se ve que la mezcla con un material reciclado en alta tasas presentó un muy desempeño al ahuellamiento y daño por humedad en el ensayo de Hamburgo comparable al de la mezcla de control de alta prestación elaborada con asfalto modificado con polímeros del tipo AM3 de Argentina (Polímero SBS). Además de mejorar notablemente el comportamiento respecto de la mezcla de control con asfalto convencional (CA30 IRAM IAPG 6835).

Referencias

[1]. Chui-Te Chiu, Tseng-Hsing Hsu, Wan-Fa Yang, (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. J. Resources, Conservation and Recycling. 52:3, 545-556,doi:10.1016/j.resconrec.2007.07.001

[2]. Kandhal PS and Mallick RB (1997). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. FHWA Report SA 97.

[3]. Kusam, A., Malladi, H., Tayebali, A. A., & Khosla, N. P. (2017). Laboratory Evaluation of Workability and Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavements. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(5), 04016276. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001825

[4]. D'angelo J., Harm E., Bartoszek J., Baumgardner G., Corrigan M., Cowsert J., Harman T., Jamshidi M., Jones W., Newcomb D., Prowell B., Sines R., Yeaton B. (2008). Warm-mix asphalt: European practice FHWA report Nº FHWA-PL-08-007.

[5]. Marina Cauhapé Casaux, Luis Zorzutti, Silvia Angelone, Fernando Martínez, (2020). Influencia en el comportamiento de mezclas templadas con emulsión por la incorporación de adiciones activas. XXXIX Reunión del asfalto.

[6]. Boriack P.C., Katicha S.W., Flintsch G.W., Tomlinson C.R. (2014). Laboratory evaluation of asphalt concrete mixtures containing high contents of reclaimed asphalt pavement (RAP) and binder. Report Number: FHWA/VCTIR 15-R8. URL https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/28316.

[7]. Pliego de especificaciones técnicas generales para mezclas densas y semidensas en caliente y semicaliente. Especificación de Vialidad Nacional Argentina. (2017).

[8]. Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos, con aporte de RAP. Especificación de Vialidad Nacional Argentina. (2017).

[9]. Jhony Habbouche, Elie Y. Hajj, Peter E. Sebaaly & Murugaiyah Piratheepan (2018). A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures. International Journal of Pavement Engineering, DOI: 10.1080/10298436.2018.1503273.

[10]. Matheus S. Gaspar, Kamilla L. Vasconcelos, Amanda H. M. da Silva, and Liedi L. B. Bernucci (2017). Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2630, 2017, pp. 110–117. http://dx.doi.org/10.3141/2630-14

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS TENSEGRÍTICAS COMO ALTERNATIVA A LOS SISTEMAS CONVENCIONALES

Luisina Domench[a], E. Ignacio Villa[a]

[a] Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
email: luisina.domench@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Tensegridad, Viabilidad, Flexibilidad, Capacidad portante.

RESUMEN

Las estructuras tensegríticas, comúnmente denominadas «tensegrities» en la literatura especializada, constituyen una tipología estructural singular en el ámbito de la ingeniería civil. Estos sistemas están compuestos por elementos lineales que conforman redes más complejas respondiendo al principio estructural de tensegridad, mediante el cual como su nombre lo indica la integridad de la estructura está basada en el auto-equilibrio tensional de sus componentes. La distribución de los esfuerzos axiles en los miembros se materializa según su comportamiento sea de tracción o compresión definiendo respectivamente a los cables y barras de cada sistema. Poéticamente, este tipo de estructuras se describe como “islas de compresión flotando en un mar de tracciones”, insinuando la discontinuidad de elementos comprimidos, así como la continuidad de miembros en tracción, materializando en conjunto una configuración espacial estable.

Las características de este tipo de sistemas estructurales son muy particulares y se incluyen desde aspectos estéticos hasta económicos. Entre varias de sus virtudes, se los identifica por su gran capacidad de optimización, ya que no existen elementos redundantes en el sistema, y por su adaptabilidad ante fuerzas externas mediante la distribución de esfuerzos uniformes en sus componentes. Adicionalmente, constituyen estructuras de ligero peso y presentan la posibilidad de rápida construcción mediante módulos elementales que permiten la materialización de sistemas tridimensionales de mayor escala.

En este artículo se presentan las principales particularidades de esta tipología estructural siendo el objetivo principal estudiar la factibilidad de su utilización como alternativa a la ejecución de sistemas convencionales. Luego de un análisis pormenorizado de sus propiedades y considerando diferentes aspectos relevantes, es posible concluir que las estructuras tensegríticas demuestran una eficiencia apreciable en aquellas situaciones en las que los requerimientos de diseño se corresponden con los beneficios mencionados en el párrafo anterior.

1. Introducción

En sus comienzos, las estructuras de tensegridad fueron de interés por su impacto visual, ya que su aplicación se encontraba principalmente en obras de arte o arquitectura. Sin embargo, a lo largo del último siglo debido a su comportamiento particular, variabilidad geométrica y capacidad adaptativa, entre otras de sus importantes virtudes, estas estructuras han acometido tanto en la ingeniería civil como en la ingeniería aeroespacial y más cercano a la actualidad en la bioingeniería.

En este artículo se desarrollará una síntesis histórica y caracterización de este tipo estructural, el cuál a simple vista dennota cierta complejidad a pesar de estar basado en leyes

elementales de la teoría de las estructuras. El objetivo principal de la investigación se centra en demostrar su viabilidad estructural en un contexto mucho más amplio del que ha constituido desde su concepción, permitiendo situar a las estructuras tensegríticas como competitivas en comparación con las estructuras convencionales de obras civiles.



Figura 1: Vista inferior estructura de tensegridad Needle Tower de Kenneth Snelson

2. Reseña histórica y características de la tipología

2.1. Breve descripcón de sus inicios

Esencialmente esta tipología se basa en el *principio estructural de tensegridad*, explicado mediante la premisa de que la integridad de la estructura está garantizada por su auto-equilibrio tensional interno. Según la bibliografía recopilada, existe cierta controversia en torno al origen y autoría de su descubrimiento. A continuación se citan los autores involucrados:

- **Richard Buckminster Fuller (EEUU, 1895-1983)** quién realizó las primeras investigaciones en el tema mediante métodos geométricos y a pesar de sus contribuciones iniciales, en sus estudios no abordó a resultados concisos. Sin embargo, más adelante definió el término de tensegridad y generó su patente.
- **David Georges Emmerich (Hungría, 1925-1996)** inspirado en el primer prototipo de sistema tensegrítico creado por Karl Ioganson (1920) estudió estructuras basadas en prismas y sistemas más complejos asentando los fundamentos para la publicación de su patente.
- **Kenneth D. Snelson (EEUU, 1927-2016)** estudiante de artes plásticas de la Universidad de Oregón, incentivado por clases de Fuller estudió fisicamente diversos modelos tridimensionales que evolucionaban progresivamente y condujeron a descubrimientos clave para el desarrollo de su patente.

Tensegrity es un término que Fuller denominó como contracción de “Tensional Integrity”, al observar el descubrimiento realizado por Snelson en la década de 1950, probando que la sinergia generada por la suma de sus esfuerzos fue lo que propició el origen del principio mencionado.

En cuanto a las definiciones reconocidas del término, se puede citar que Snelson identifica a una tensegridad como: “sistema estructural cerrado compuesto por un conjunto de tres o más barras comprimidas dentro de una red de tendones atirantados, ... para así formar una firme, triangulada y pretensada unidad de tensión y compresión.”

Algunos años más tarde, Anthony Pugh (1976) describió la tensegridad conformando la definición más clara y precisa de carácter universal: “Un sistema tensegrítico se establece cuando un conjunto discontinuo de componentes sometidos a compresión interactúa con un

conjunto continuo de elementos sometidos a tracción definiendo un volumen estable en el espacio."

Por último, René Motro (2003) formuló la definición "extendida" de la siguiente manera: "Un sistema tensegrítico... está en equilibrio, es estable por sí mismo y comprende un conjunto discontinuo de componentes comprimidos dentro de un conjunto continuo de componentes atirantados".

En términos generales, todos los autores definen a los sistemas tipo *Tensegrity* desde los mismos aspectos fundamentales.

2.2. Conceptos teóricos

Básicamente, las estructuras tensegíticas conforman un sistema de elementos sometidos a esfuerzos axiles de tensión o compresión según su naturaleza lo permita, a los cuáles se denominará "barras", cuando estén comprimidos y "cables" cuando esten sometidos a tracción.

Luego de una recopilación bibliográfica de estudios e investigaciones acerca de esta tipología, se elabora un listado pormenorizado incluyendo algunas de los conceptos fundamentales que permiten clasificar estructuras como del tipo *tensegrity*:

- Existe una discontinuidad de miembros comprimidos «barras», y por lo contrario una continuidad de miembros en tracción «cables».
- Los cables son los elementos que garantizan el equilibrio y la estabilidad del sistema.
- Las barras estan limitadas a líneas de acción cortas para evitar ser propensas a sufrir efectos de la esbeltez y su falla por pandeo.
- Existen mecanismos de carácter infinitesimal que pueden estabilizarse por un estado tensional propio.
- No hay puntos de debilidad local, ya que las fuerzas se transfieren muy rápidamente en los elementos.
- Las fuerzas que aparecen en la estructura, se distribuyen de la manera más óptima posible conduciendo a la eliminación de elementos redundantes.
- La respuesta de la estructura bajo cargas es no lineal.



Figura 2: Vista Lateral Estructura de tensegridad V-X de Kenneth Snelson

Existe una variabilidad de aplicaciones y casos de estructuras que implementan este principio de forma pura como así también combinado con otras tipologías estructurales.

Para poder interpretar estas estructuras, muchos autores se han apoyado en la aplicación práctica de crearlos físicamente y observar su comportamiento mecánico, lo cuál se considera una gran herramienta en el universo de la tensegridad. Las grandes estructuras que responden a esta tipología por lo general estan compuestas por módulos simples ensamblados y la ejecución de modelos a escala se considera de gran ayuda a la hora de concebir el proyecto.

Teóricamente, para entender el comportamiento de *equilibrio estable independiente de reacciones externas*, es necesario realizar un análisis estático de las fuerzas que intervienen en cada nudo, de modo que cada vértice en cuestión esté en equilibrio para así dotar de estabilidad total a cada elemento y, por consecuente, a la estructura. Recopilando los conceptos anteriores, la Figura 3 puede servir de ilustración.



Figura 3: Estructura tipo Simplex compuesta por 3 puntales o barras -rojo- + 9 cables -azul-

En la estructura tipo Simplex, cada barra -rojo- está sometida a la tensión que generan sobre ella los cables -azules- atados a sus extremos. Se puede ver que en cada nudo, es imprescindible la existencia de al menos tres cables para garantizar la estabilidad de la barra. Además, la resultante de cada sistema de fuerzas nodales debe estar alineada con el eje longitudinal de cada barra, para evitar momentos flectores infinitesimales que provoquen una inestabilidad del equilibrio o falla por pandeo del elemento. Como consecuencia, cada cable, debido a la influencia despreciable del peso propio, se encontrará en equilibrio si está sometido a una determinada tensión que suele estar ocasionada por un esfuerzo de pretensado. Por este motivo, una de las características principales de las estructuras tensegríticas es su identificación como autoequilibradas y pretensadas.

2.3. Características principales

A partir de esta sección se propone exponer algunas de sus propiedades fundamentales a fines de poder contrastarlas con las estructuras convencionales y detectar o ponderar la viabilidad de la tipología.

- El comportamiento de todo el conjunto no es predecible a partir del comportamiento de sus componentes considerados individualmente.
- La resiliencia o rigidez de la estructura depende de los materiales empleados en los elementos y del modo de ensamblaje de los mismos.
- Respecto a la geometría, la mayoría de los sistemas tensegríticos son enantiomórficos, lo que significa que se presentan con igual geometría pero dispuesta en sentido inverso.
- Poseen elasticidad multiplicativa, es decir que el acortamiento de los cables es muchísimo menor que la distancia entre dos barras.
- El grado de pretensado aplicado a la estructura es directamente proporcional a su capacidad portante o resistente, asi como al volumen de la estructura.
- El sistema puede recuperar su posición original posteriormente a ser afectado por acciones externas.
- Poseen indeterminación cinemática, lo que significa que solo una pequeña cantidad de energía sería necesaria para cambiar su configuración.
- Tienen la capacidad de responder globalmente, por lo que cualquier carga puntual a la que se les someta es transmitida uniformemente y absorbida por toda la estructura distribuyendo las tensiones internamente en sus elementos.

3. Discusión y análisis

En miras de comparar esta tipología con la ejecución de estructuras convencionales se citan las principales ventajas en base a lo analizado en la sección anterior:

- ✓ Distribuyen las cargas uniformemente en todos los elementos evitando la redundancia.
- ✓ Resulta factible el empleo de materiales de forma económica y rentable.
- ✓ Para su ligero peso tienen una gran capacidad portante.
- ✓ Al ser estructuras livianas y resistentes aportan tambien la propiedad de la sostenibilidad.
- ✓ Estabilidad en cualquier posición ya que presentan un auto-equilibrio interno que les brinda independencia tanto del peso propio, asi como de anclajes o fijaciones externas.
- ✓ Son adecuadas cuando es necesario absorber impactos o vibraciones sísmicas.
- ✓ Tienen la capacidad de crear sistemas más complejos mediante el ensamblaje de otros más simples lo cual es una gran ventaja en la etapa de ejecución.

Una aplicación de tensegridad que evidencia algunos de los aspectos mencionados anteriormente es el caso de la construcción del Needle Tower de Kenneth Snelson vista desde la parte central inferior en Figura 1. En esta estructura se demuestra su capacidad para absorber fuerzas distribuidas uniformemente, sin necesidad de un soporte rígido central. A diferencia de una torre convencional, donde el peso se distribuye directamente hacia el suelo, la estructura tensegrítica distribuye las cargas a través de los cables, optimizando el material y evitando puntos de debilidad.

Como contrapartida, se citan las desventajas que pueden evidenciarse en su aplicación:

- ✗ Tienen un grado relativamente alto de deformaciones.
- ✗ Presentan escasa eficiencia del material, en comparación con estructuras convencionales geométricamente rígidas.
- ✗ Son muy sensibles a las vibraciones, especialmente bajo cargas dinámicas.
- ✗ Para mantener el estado de auto-tensión, es necesario someterlas a un estado de pretensado que requeriría de fuerzas muy elevadas para su estabilidad.
- ✗ En zonas donde se espera un alto nivel de vibración, la estructura puede necesitar ajustes en el pretensado para evitar resonancias que puedan comprometer su estabilidad.
- ✗ La fabricación de configuraciones esféricas y abovedadas son complicadas de ejecutar.
- ✗ A medida que algunos diseños crecen en tamaño, los elementos básicos empiezan a interferirse entre ellos, complejizando el proyecto.
- ✗ La búsqueda de forma de tensegridades puede resultar excesivamente compleja lo que hace indispensable el uso de programas informáticos diseñados al efecto.

En resumen, a pesar de que la fabricación de estructuras tensegríticas puede ser más costosa debido a la precisión que requiere el pretensado de cables y el ensamblaje de elementos, el uso de materiales más ligeros y la facilidad de construcción modular pueden resultar en una ventaja de costo en proyectos de menor escala. En cambio, para grandes proyectos de infraestructura, aunque las estructuras de tensegridad tienen una alta eficiencia en términos de resistencia y peso, su construcción y mantenimiento son complejos y es en ese punto donde las estructuras convencionales a menudo ofrecen una solución más económica en términos de materiales y tiempos de construcción.

En base a la información recopilada se ha realizado un análisis cualitativo a fines de la comparación. Cabe destacar que para poder contrastar las tipologías de manera cuantitativa debería realizarse unn investigación de mayor índole mediante la cual a partir de una simulación numérica en programas informáticos usando ecuaciones de equilibrio y compatibilidad permita estimar las tensiones en cables y barras, asi como desplazamientos y

vibraciones de la estructura global y de esa manera evaluar el comportamiento de cada una. Además esto debería complementarse con un análisis de cómputo y presupuesto de cada opción para poder evaluar la eficiencia y sostenibilidad en el proyecto considerado.

4. Conclusiones

Como se ha mencionado en las secciones anteriores las características de este tipo de sistemas estructurales son muy particulares y se incluyen tanto aspectos estéticos como económicos, considerando que en cada proyecto alguno de estos tendrá mayor preponderancia. En cuanto al objeto del artículo consistente en evaluar la viabilidad estructural de esta tipología frente a las convencionales, se puede observar que esta cualidad dependerá del contexto del proyecto y de los criterios específicos que se consideren relevantes, como ser capacidad portante, peso de la estructura, aptitud en servicio o confort, costo y complejidad de ejecución, entre otras.

En resumen, la tipología planteada representa una interesante alternativa en la ingeniería moderna, ofreciendo ventajas significativas en términos de eficiencia de materiales, flexibilidad y adaptabilidad. Este análisis permite concluir que las estructuras tensegríticas son factibles como estructuras de liviano peso y fácil montaje para proyectos en los que se requiera cubrir pequeñas luces, salvar cortas distancias o soportar infraestructuras ligeras.

Se resalta la necesidad de seguir explorando el comportamiento de las estructuras de tensegridad bajo diferentes condiciones dinámicas, como cargas sísmicas o de viento con la finalidad de evaluar circunstancias en las que este tipo de estructuras sean propensas a ser la solución óptima o más armónica. Además, el desarrollo de materiales más accesibles y la automatización de procesos de construcción podrían ser claves para su adopción en proyectos de mayor escala.

Por último y con el objetivo de generar una discusión acorde al ámbito de presentación del artículo se considera fundamental que los estudiantes y profesionales de ingeniería se familiaricen con el concepto de tensegridad, ya que ofrece un enfoque innovador sobre la distribución de fuerzas y materiales, por ejemplo el aislamiento completo de la compresión y tracción en diferentes elementos, permite una excelente intuición acerca del comportamiento mecánico de las estructuras, ayudando a comprender mejor la transmisión de fuerzas y la rigidez de los cuerpos en general.

Bibliografia

- Valentín Gomez Jauregui, Tensegrity Structures and their application to architecture / Tesis, 2004. Kenneth Snelson, Art and ideas / Art´ıculo, 2013.

- Arq. Cristhian Fernando Castro Arenas, Tensegridad y biotensegridad: de las estructuras naturales al dise˜no / Tesis, 2020

- Andrea Micheletti and Paolo Podio-Guidugli, Seventy years of tensegrities (and counting) / Artículo, 2022.

INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN TOPOLÓGICA EN EL PROCESO DE BÚSQUEDA DE FORMA DE ESTRUCTURAS TENSEGRÍTICAS

Domench, Luisina Villa, E. Ignacio

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
email: luisina.domench@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Tensegridad, Búsqueda de forma, densidad fuerza, estabilidad, meta-programa.

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes que abarca el diseño de estructuras de tensegridad es el proceso de búsqueda de forma, también conocido como form-finding, en el cual sus dificultades surgen de pretender encontrar una configuración de auto-equilibrio que satisfaga de manera eficiente todas las propiedades específicas requeridas. Este tipo de estructuras posee una gran cantidad de nudos y elementos acompañado de un comportamiento no lineal del sistema, lo cual deriva en la necesidad del uso de programas de análisis y simulación numérica diseñados específicamente para la resolución de la búsqueda de forma.

Inicialmente, las estructuras tensegríticas fueron estudiadas por métodos puramente geométricos, que hicieron de las más importantes contribuciones para su desarrollo.

Posteriormente, se implementaron métodos más refinados, que pueden subdividirse en cinemáticos y estáticos. En cuanto a los primeros, consisten en un análisis sistemático mediante métodos numéricos que minimizan o maximizan la longitud de uno de sus componentes mientras que el otro permanece invariable. Algunos ejemplos son la solución analítica de equilibrio de nudos y el método de relajación dinámica, sobre los cuales es importante destacar que presentan restricciones por cuestiones de simetría y escala, además de limitarse a estructuras que no están completamente definidas. Respecto a los métodos estáticos, se basan en la minimización de la energía potencial del sistema. Dentro de este grupo, el procedimiento más utilizado en la práctica es el método de densidades de fuerza. Esta solución más allá de simplificar el análisis a un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio se encuentra atravesado por la dificultad del cálculo de los coeficientes de tensión, que se obtienen como el cociente entre la fuerza y la longitud de cada componente estructural.

En la bibliografía se han encontrado procedimientos aplicados a la mayoría de las soluciones mencionadas en el párrafo anterior. Además, se ha notado que cada método se estudia de manera individual careciendo de un análisis que englobe todas las posibilidades.

En este trabajo se presentan los primeros resultados correspondientes al desarrollo de un meta-programa que optimice la elección del método de form-finding, en el cual la información de partida necesaria del procedimiento aplicable tienda a coincidir con las particularidades de la conformación espacial. Específicamente, se analiza cómo la influencia de las características de la configuración inicial de una estructura tensegrítica (ya sea condiciones de simetría o conectividad entre elementos, entre otras) pueden conducir a la utilización de algún método en particular, o por lo contrario presenten aspectos topológicos que tiendan a complejizar el proceso.

1. Introducción

Básicamente, las estructuras tensegíticas «tensegrities» conforman un sistema de elementos sometidos a esfuerzos axiles de tensión o compresión según su naturaleza lo permita, a los cuáles se denominará “barras”, cuando estén comprimidos y “cables” cuando esten sometidos a tracción.

El análisis de este tipo de estructuras comprende tres pasos principales: el primero es la búsqueda de forma o form-finding (F-F), el segundo se refiere a la respuesta de la estructura frente al peso propio y el último al estudio de su comportamiento bajo acciones externas. Respecto al primer paso, considerado el de mayor preponderancia en el presente artículo, se debe destacar que debido al alto comportamiento no lineal de estas estructuras se requieren métodos adecuados de F-F para encontrar una configuración de equilibrio válida.

Los distintos métodos de búsqueda de forma existentes tienen sus bondades como así también sus puntos débiles, que a continuación se desarrollan con el fin de comparar y ponderarlos en función de aspectos relevantes que competen al diseño estructural. El propósito principal del proceso es que la configuración resultante satisfaga eficientemente todas las propiedades específicas requeridas, lo cual nos ha inspirado en la presente investigación a pensar en el desarrollo de un meta-programa que facilite la elección de método a aplicar.

2. Descripción de métodos de form-finding existentes

A principios del siglo XX, las estructuras de tensegridad fueron estudiadas por métodos puramente geométricos basándose en estructuras simples con altas propiedades de simetría.

Sin embargo, investigaciones posteriores demostraron que las configuraciones posibles de resolver por este tipo de métodos eran muy restringidas siendo las topologías resultantes de escueta fidelidad con las formas geométricas conocidas. De esta manera, comienza la continua exploración en el tema, mediante el estudio de métodos consistentes en análisis sistemáticos y modelos numéricos complejos. Durante el último siglo se ha desarrollado bibliografía muy variada que presenta un gran consenso en la subdivisión general de los métodos existentes entre los de carácter cinemático y estático.

2.1. Métodos cinemáticos

Se los puede caracterizar mediante la premisa de que determinan la configuración de la longitud máxima de los puntales mientras que la longitud de los elementos tipo cable no puede variar, o por lo contrario obtienen la longitud mínima de los cables, mientras la longitud de los puntales se mantiene constante. Se trata de procedimientos que permiten obtener detalles de configuración de estructuras que ya son esencialmente conocidos, para lo cual se han estudiado formas regulares a fines de su validación, como las estructuras tipo de Figura 1.

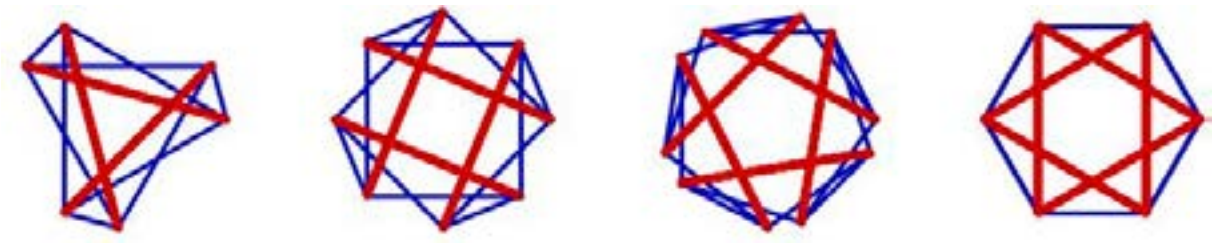


Figura 1: Configuraciones regulares y simétricas de resolución simple por todo tipo de métodos

Una limitación clave es la imposibilidad de implementarlos en estructuras cuya definición no sea completa, además de presentar restricciones por cuestiones de simetría y/o escala.

Dentro de este tipo de métodos, se puede encontrar el más simple consistente en una **solución analítica de equilibrio de nudos (SA)**, mediante el cual las ecuaciones de equilibrio de la estructura completa pueden ser simplificadas a las de los nodos representativos en

función de parámetros geométricos. La aplicación del método se esquematiza en Figura 2.

$$\mathbf{p}_1 = [r, 0, 0]$$
$$\mathbf{p}_2 = [r \cdot \cos\alpha, r \cdot \sin\alpha, h]$$
$$\mathbf{p}_3 = [r{\cdot}\cos\beta, r{\cdot}\sin\beta, h] \quad \text{donde } \beta = \alpha + \frac{2\pi j}{v}$$
$$\mathbf{p}_4 = \left[r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{v}\right), -r \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{v}\right), 0\right]$$
$$\mathbf{p}_5 = \left[r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{v}\right), r \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{v}\right), 0\right]$$

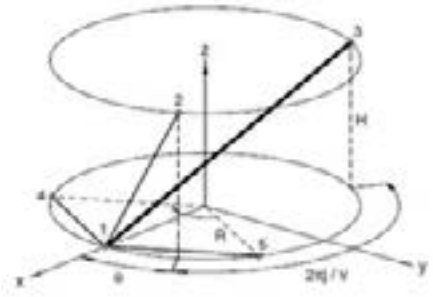


Figura 2: Esquema de elementos congruentes a nodo 1 - extremo inferior izquierdo

Este análisis permite obtener el ángulo para el cual para una dada longitud de cable l_c la longitud de los puntales l_s es maximizada:

$$\beta = \pi\left(\frac{1}{2} - \frac{j}{v}\right) \tag{1}$$

Es posible prever que este método no será factible para estructuras no-simétricas debido al largo número de variables requeridas para describir una configuración general, además se trata de un método que no asegura estabilidad de la estructura ni analiza fuerzas externas. Salvando esto, un aspecto importante es que no necesita una configuración inicial válida, pero si una topología dada como ser la conectividad entre elementos y coordenadas de los nodos.

Otro método considerado de carácter cinemático es el de **optimización ó programación no lineal (PNL)** que consiste en un problema de minimización restringida. Para su aplicación es necesario conocer la configuración y topología inicial, por lo que se ha validado en estructuras regulares como el prisma triangular y el tetraedro regular de Figura 1. Para su resolución, se plantea una función objetivo determinada -Ecuación 2-, como ser "longitud negativa de uno de los puntales" siendo el objeto de estudio buscar el mínimo de dicha función.

$$f(x, y, z) = -l_s^2 \tag{2}$$

Mediante este método se pueden encontrar diversas configuraciones de estructuras con igual topología para diferentes relaciones entre longitud de puntales y cables. Como contrapartida se destaca que es un método que no asegura estabilidad y no analiza fuerzas externas.

Por último, constituyendo el método de mayor aplicación dentro de los cinemáticos se presenta el **método de relajación dinámica (MRD)**, en el cual se minimiza la energía del sistema a partir de una amortiguación cinética de la estructura. Mediante una configuración y topología inicial válidas, se puede calcular el equilibrio integrando ecuaciones dinámicas ficticias, como se expresa a continuación en Ecuación 3:

$$M\ddot{d} + D\dot{d} + Kd = f\,[N] \tag{3}$$

M	Matriz de masa $[kg]$	$\ddot{d}$	Vector aceleración $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
D	Matriz de amortiguamiento $\left[\frac{N \cdot s}{m}\right]$	$\dot{d}$	Vector velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$
K	Matriz de rigidez $[N/m]$	d	Vector desplazamiento $[m]$

Este método permite encontrar una configuración estable y además es posible analizar fuerzas externas. Se destaca que es indispensable plantear una relación constitutiva para su análisis y un esquema de diferencias finitas centrado para resolver el sistema de ecuaciones.

A pesar de ser el método más completo de los cinemáticos, siendo muy conveniente en estructuras regulares, cabe aclarar que para estructuras no-regulares el método se vuelve engorroso debido a las relaciones variables entre barras y cables a considerar.

2.2. Métodos estáticos

Los métodos estáticos se basan principalmente en minimizar la energía potencial de la estructura de tensegridad mediante la consideración de una o más restricciones. Para ello, se requiere una estructura con topología y fuerzas en sus miembros dada.

De igual modo que en la sección anterior, se puede encontrar el método más elemental consistente en una **solución analítica (SA)**, relegada a la aplicación en estructuras simples y simétricas. Permite encontrar configuraciones estables mediante la resolución de ecuaciones que parten de condiciones de equilibrio nodales y argumentos de simetría, en términos de la *densidad fuerza* de los elementos -también llamado coeficientes de tensión.

$$q_{ij} = \frac{t_{ij}}{l_{ij}} \tag{4}$$

Como se observa en Ecuación 4, los coeficientes de densidad-fuerza se obtienen como el cociente entre la fuerza *tij* y la longitud del elemento *lij*, y se trata de un concepto fundamental para todos los métodos de carácter estático. A continuación, a modo de ejemplo se presenta la resolución del elemento de Figura 2 mediante este método.

$$q_{1,4} = q_{1,5}$$
$$q_{1,2} \cdot h + q_{1,3} \cdot h = q_{1,2} \cdot r \cdot \sin\alpha + q_{1,3} \cdot r \cdot \sin\beta = 0$$

Es posible concluir que se llega a resultados donde el ángulo β para el cual todos los cables están traccionados es el mismo que el informado en Ecuación 1.

Como una solución más compleja, se encuentra el método más aplicado conocido como **método de densidad fuerza (MDF)**, el cual consiste en la resolución de ecuaciones lineales de equilibrio en términos de las densidades de fuerza -Ecuación 5- para cada una de las coordenadas nodales, siendo para la dirección x:

$$\sum_j q_{ij} \cdot (x_i - x_j) = f_{ix} \tag{5}$$

Se observa que para implementarlo se debe conocer previamente los coeficientes de tensión de todos los elementos o en su defecto, incluir restricciones de forma. Además se resalta que no se trata de un método de fácil aplicación debido a la complejidad en la determinación de las densidades de fuerza de cada elemento, las cuales pueden obtenerse mediante búsquedas iterativas limitando la deficiencia requerida o mediante un método analítico que insume mayor cantidad de tiempo.

Esencialmente, para una estructura de *m* elementos y *n* nudos, la ecuación de equilibrio en dirección *x* será análoga a las correspondientes en direcciones *y-z* y se presenta como:

$$C_s^T \cdot Q \cdot C_s \cdot \chi_s = f_x \tag{6}$$

$C_s =$ Matriz de conectividad de dimensiones $m \times n$
$Q =$ Matriz diagonal de densidades de fuerza $\left[\frac{N}{m}\right]$
$\chi_s =$ Vector columna de coordenadas en X $[m]$

Además, se define como matriz de densidades de fuerza a la constituida por:

$$D = C^T \cdot Q \cdot C \tag{7}$$

$$D_{ij} = \begin{cases} -q_{ij}, & \text{si } i \neq j \\ \sum_{k \neq i} q_{ik}, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i, j \text{ no están conectados} \end{cases}$$

Considerando que durante el proceso de búsqueda de forma no existen fuerzas externas, la Ecuación 6 se iguala a 0. De esta manera, D siempre será cuadrada y singular con nulidad de al menos 1. Además es semi-definida debido a la presencia de miembros en compresión que conllevan un valor de *qij* negativo, repercutiendo desfavorablemente en el proceso.

A pesar de esta complejidad analítica, como algunas de sus bondades podemos destacar que se adapta bien a situaciones donde las longitudes de los elementos de la estructura no se especifican inicialmente, por lo que se pueden producir fácilmente nuevas configuraciones. Se trata de un método que es capaz de analizar fuerzas externas, y se debe contemplar que no permite el control sobre las longitudes de los elementos de la estructura a medida que varía el conjunto de coeficientes de tensión.

El siguiente método se basa en un enfoque de **minimización de energía (ME)** que produce una matriz idéntica a la de densidad fuerza «hay consenso en que ambos métodos son equivalentes» . Para explicarlo, considerando que una red de tensegridad *G(p)* es el grafo en *p* donde cada borde esta designado como un cable o puntal. El estado tensional *w* para *G(p)* es un estado de auto-equilibrio y se especifica en Ecuación 8:

$$\sum_j \omega_{ij} \cdot (p_i - p_j) = 0 \tag{8}$$

$$\omega_{ij} \geq 0 \quad \text{para cables;} \quad \omega_{ij} \leq 0 \quad \text{para puntales}$$

Debe distinguirse que el equilibrio planteado es necesario pero no suficiente para asegurar la estabilidad de la estructura, por lo que restaría asignar una función de energía potencial y buscar el mínimo de dicha función -Ecuación 9-.

$$E(p) = \frac{1}{2} \sum_j \omega_{ij} \cdot \|p_i - p_j\|^2 \tag{9}$$

Básicamente, cuando el extremo de un elemento se desplaza, la energía aumenta como una función al cuadrado de dicho desplazamiento. De este modo, siendo p un vector columna de longitud *dn* que contiene las coordenadas de x, y, z, se reescribe la ecuación 9 como:

$$\bar{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$E(p) = \frac{1}{2} \bar{p}^T \cdot \begin{pmatrix} \Omega & \cdots & \Omega \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Omega & \cdots & \Omega \end{pmatrix} \cdot \bar{p} \tag{11}$$

Donde los elementos de Ω son conocidos, y la matriz es idéntica a la de Ecuación 7:

$$\Omega_{ij} = \begin{cases} -\omega_{ij}, & \text{si } i \neq j \\ \sum_{k \neq i} \omega_{ik}, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i, j \text{ no están conectados} \end{cases} \tag{12}$$

Para poder obtener el equilibrio de esta matriz se utilizan cálculos simbólicos debido a la complejidad numérica que implica. Mediante la aplicación de este método, solo se han encontrado soluciones para estructuras simétricas. Se trata de un método que no necesita una configuración pero si una topología inicial válida. Además, no es posible analizar fuerzas externas ya que no son un parámetro dentro de la ecuación. Lo más destacable del desarrollo de este método ha sido la inclusión de conceptos de superestabilidad y teoría de grupos.

Por último, dentro de los métodos clasificados por Tibert y Pellegrino se encuentra el **método de coordenadas reducidas (MCR)** que consiste en la búsqueda de configuraciones de equilibrio de un conjunto de cuerpos rígidos conectados por cables cuyas longitudes se quieren determinar. En su aplicación se utiliza un conjunto de ecuaciones reducidas de equilibrio obtenido mediante el trabajo virtual, que involucra una extensión de los puntales igual a 0, para lo cual se utilizan condiciones de simetría. Se trata de un método que asegura estabilidad en su resolución, y no necesita una configuración pero si una topología inicial válida. Se debe destacar que no es posible analizar fuerzas externas mediante el mismo y

como una gran ventaja en comparación a los anteriores, se caracteriza por ofrecer un mayor control sobre las longitudes de los elementos a costas de un requerimiento de manipulaciones simbólicas más extensas.

3. Análisis y comparación de métodos

En base a la información recolectada se puede observar que a pesar de que las investigaciones sobre estructuras de tensegridad han aumentado constantemente durante las últimas dos décadas, los resultados de búsqueda de forma para estos sistemas muestran que existen limitaciones en los métodos planteados en la sección anterior, ya sea por las condiciones iniciales que se requieren, la estabilidad resultante o por la complejidad en el desarrollo analítico del método.

A continuación, se elabora una tabla con algunas cuestiones de importancia que permiten comparar los métodos presentados, indicando con una cruz × el requerimiento planteado, y con un tick ✓ la característica del análisis o resultado esperado.

Cabe destacar que según la autora, el método que menor cantidad de características iniciales requiera «topología, simetría», propicie un análisis más completo y garantice un sistema estable será el *óptimo*.

Tabla 1: Clasificación de métodos según sus requerimientos y resultados de análisis

MÉTODO	**Requerimientos**			**Análisis**	**Resultado**
	Configuración inicial	**Topología inicial**	**Simetría estructural**	**Fuerzas externas**	**Sistema estable**
CIN (SA)	-	×	×	-	-
CIN (PNL)	×	×	-	-	-
CIN (RD)	×	×	-	✓	✓
EST (SA)	-	×	×	-	✓
EST (DF)	-	×	-	✓	✓
EST (ME)	-	×	-	-	✓
EST (MCR)	-	×	×	-	✓

Se puede observar que todos los métodos requieren la definición de una topología inicial, lo que significa conectividad entre los nudos y elementos del sistema, esto nos permite diluscidar que la influencia de la configuración topológica es un aspecto que está ligado a la resolución del proceso de búsqueda de forma.

Por otro lado, algunos métodos son más limitados y requieren que directamente este establecida la configuración inicial, o lo que significa la posición real y longitud de cada elemento, lo cual restringe cierta libertad en el diseño del proyecto.

Los requerimientos de simetría son imprescindibles en varios métodos, ya que son un artilugio para simplificar los extensos cálculos y ecuaciones matemáticas que derivarían de lo contrario.

En la etapa de análisis, es importante que se pueda evaluar la estructura tanto en condición auto-equilibrada como para cargas externas, para así poder evaluar su adaptabilidad. En este caso se observa que solo algunos de los métodos cumple con esta valorable peculiaridad.

Por último, la estabilidad del sistema es el aspecto más importante a considerar, ya que si un método sirve para resolver el proceso de búsqueda de forma pero no para devolver una configuración estable, no se considerará un método aplicable en términos teóricos.

De esta manera, se destaca que el método óptimo es evidentemente el *método de densidad fuerza*, para el cual el único requerimiento es el conocimiento de la topología de la estructura «para la definición de los coeficientes de tensión».

4. Conclusiones

Los métodos de form-finding existentes se desarrollan en variadas bibliografías con mayor o menor detalle cada uno, es por este motivo que el presente artículo los ha detallado con sus principales particularidades de modo de poder contrastar unos y otros con el fin de su ponderación y comparación.

Como se ha mencionado inicialmente, la ambición más importante de esta investigación es la recopilación de información a favor del desarrollo y ejecución de un meta programa que permita decidir e indicar la elección óptima del método de búsqueda de forma de estructuras de tensegridad.

Cabe destacar que en esta investigación se han hallado resoluciones a partir de métodos de elementos finitos, algoritmos genéticos, entre otros, validados para configuraciones determinadas mediante la aplicación de métodos concretos, en general el método de densidad fuerza, lo cuál justifica la discusión en la que se ha encontrado que el mismo es el método óptimo en cierto tipo de problemas.

De todas maneras, se ha detectado la carencia en cuanto a la variabilidad de aplicación de métodos según las restricciones del problema, las cuales pueden ser la definició de una configuración inicial o aspectos de simetría que permitan minimizar el tiempo de análisis.

En base al criterio formado a lo largo de esta investigación, se considera que cada método será adecuado, cuando cumpla alguna de las siguientes premisas: conducir a un menor error, brindar una rápida ejecución u obtener resultados más confiables. En la medida que un método en específico conduzca a alguna de las citadas u otras características favorables para un determinado problema con ciertas condiciones iniciales, se caracterizará como óptimo para cada problema en particular.

Bibliografia

Keviche Motro, Geometrical non-linear analysis of tensegrity systems / Article, 1999.

Tibert and Pellegrino, Review of Form-Finding methods for Tensegrity Structures / Artículo, 2001.

Chandana Paul, Hod Lipson, Francisco J. Valero Cuevas, Evolutionary Form-Finding of Tensegrity Structures, 2005.

A.H. Nadia Farhana, C. L. OH, H. M. Yee, A. Anizahyati, Overview on the Form-Finding of Tensegrity Structure / Artículo, 2018.

MODELO DE CAMPO DE FASE DE HORMIGONES REFORZADOS CON CAUCHO: IMPREMENTADO EN ABAQUS

Julián E. Jurado[a], Matias Braun[b,c], Edgardo I. Villa[a], Claudio G. Rocco[a]

[a] Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
[b] INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales.), CONICET, Avda. Colón 10850, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
[c] ETSIAE, Universidad Politécnica de Madrid, Plaza Cardenal 3, Madrid 28040, España.
email: julian.jurado@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Campo de Fase, Hormigones Reciclados, Mecánica de Fractura, MEF.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y la degradación ambiental exigen soluciones sostenibles en todos los ámbitos industriales y de la construcción, destacando la urgencia de disminuir el consumo de recursos y la generación de residuos. En este contexto, la gestión del caucho procedente de neumáticos usados resulta especialmente crítica, pues cada año se desechan más de 1.5 mil millones de unidades. Una estrategia prometedora es la sustitución parcial de los agregados gruesos del hormigón por partículas de caucho reciclado, lo que alivia la presión sobre los vertederos y contribuye a la conservación de recursos naturales.

No obstante, la inclusión de caucho, si bien aporta flexibilidad y capacidad de absorción de impactos, puede comprometer la resistencia a compresión y la rigidez del hormigón, requiriendo una cuidadosa optimización de su contenido. Para predecir con precisión la evolución del daño y la fractura, es fundamental el uso de modelos numéricos a escala mesoscópica, capaces de representar con detalle las interacciones entre agregados, y la pasta de mortero. Estos modelos permiten diseñar mezclas de hormigón con materiales reciclados que mantengan, o incluso mejoren, la durabilidad, la resiliencia y la sostenibilidad de las construcciones.

Este estudio presenta la implementación de un Modelo de Campo de Fase (MCF) bidimensional para examinar las propiedades mecánicas a mesoescala del hormigón reforzado con caucho reciclado [1]. El modelo se implementa a través de una subrutina UELMAT dentro del software comercial de elementos finitos Abaqus [2]. La simulación incorpora fases discretas para el agregado, el caucho, el mortero y sus correspondientes interfaces. Para generar el modelo a mesoescala, se empleó un script de Python para facilitar la incorporación aleatoria de partículas dentro de la matriz de mortero [3]. La subrutina de tipo UELMAT utilizada fue la desarrollada por Martínez-Pañeda [4]. Los resultados del MCF se validan con datos experimentales y se comparan con un Modelo de Plasticidad con Daño del Hormigón (MPDH). Este análisis comparativo evalúa la capacidad de cada enfoque de modelado para capturar con precisión la evolución del daño y las características de fractura del hormigón con caucho.

2. PROBLEMA ANALIZADO

El presente estudio se centra en la simulación numérica de ensayos de tracción directa en muestras cilíndricas de hormigón con una altura de 200 mm y un diámetro de 100 mm [5]. En su análisis, los autores tomaron como referencia un hormigon con una resistencia a la com-

presión de 70 MPa y con un 36.8 % de agregado grueso en volumen.

La relación volumétrica de caucho, denotada como ρ_{vr}, se define como la relación entre el volumen total de agregado grueso sustituido en el hormigón armado y el volumen total de agregado grueso en el hormigon sin caucho de referencia. Para este trabajo se tomaron valores de ρ_{vr} entre 0 y 0.60.

La resistencia a tracción del hormigón con caucho esta dada por [5]:

$$f_{ctr} = 0{,}24 f_{cr}^2 \tag{1}$$

Donde f_{cr} es la resistencia a compresión del hormigón con caucho, obtenida de la siguiente expresión:

$$f_{cr} = \frac{1}{1 + 2(\frac{3\lambda\rho_{vr}}{2})^{\frac{3}{2}}} f_{c0} \tag{2}$$

Donde f_{c0} es la resistencia de la mezcla de hormigón de referencia sin caucho y λ representa el rango de tamaño del agregado sustituido, para agregado grueso λ = 2.08 [5].

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

3.1. MODELO MESOSCÓPICO

Se propuso un Modelo de Elementos Finitos (MEF) mesoscópico para el hormigón, en el que el mortero, el caucho, el agregado grueso y las interfaces se representan como elementos constituyentes bidimensionales. El caucho y el agregado se representan mediante círculos discretos. El algoritmo Python utilizado para generar el MEF fue implementado y validado por Jurado *et al.* [3].

Las muestras tienen las siguientes dimensiones: 100×200 mm^2. Se aplica una carga de tracción uniaxial a la muestra. Los análisis se realizan en condiciones de deformación plana con un espesor fuera del plano de 100 mm.

Las inclusiones se representan mediante un modelo constitutivo elástico lineal. Las dos teorías mencionadas anteriormente se emplean en el modelado del mortero y las interfaces. En consecuencia, se construirán dos modelos: uno utilizando el MPDH y otro utilizando el MCF. Los modelos numéricos incorporan las propiedades mecánicas elásticas que se mencionan a continuación. Para el agregado, el módulo de Young E es 70000 MPa y con un coeficiente de Poisson ν de 0.2. La matriz de mortero tiene un módulo de Young de 33700 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.2. En la interfaz agregado-mortero, el módulo de Young es 23600 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.2. Por el contrario, el caucho presenta un módulo de Young notablemente inferior de 50 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.5. La interfaz mortero-caucho se distingue por un módulo de Young de 12000 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.2.

3.2. MODELO CAMPO DE FASE

Si definimos un cuerpo elástico, ocupando un dominio $\Omega \subset \Re^n$ (n $\in$ [1, 2, 3]), con una grieta representada por una topología de grieta difusa. El MCF introduce un escalar ϕ como variable de campo de fase, tomando valores entre 0, para material intacto, y 1, para material totalmente dañado. La energía potencial total del solido en ausencia de fuerzas externas se define como:

$$\Psi(\varepsilon, \phi) = \int_\Omega (1-\phi)^2 \psi(\varepsilon) \mathrm{d}V + \int_\Omega G_c \left(\frac{\phi^2}{2l_0} + \frac{l_0}{2} |\nabla\phi|^2 \right) \mathrm{d}V \tag{3}$$

Donde l_0 representa el ancho del dominio de la grieta difusa, ψ es la densidad de energia de deformación, ε es el tensor de deformaciones, G_c es la tasa crítica de liberación de energía o tenacidad del material. Para obtener la formulación fuerte del problema de fractura, se toma la variación de la energía potencial total (ver Eq. (3)) con respecto a ε y el parámetro ϕ:

$$(1-\phi)^2 \nabla \cdot \sigma = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \tag{4}$$

$$G_c \left(\frac{\phi}{l_0} - l_0 \nabla^2 \phi \right) - 2(1-\phi)\psi = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \tag{5}$$

Los parametros a definir en el MCF se muestran en la Tabla 1. Estos valores se adoptan a partir de la literatura de referencia [3, 6]. A las interfaces agregado-mortero y caucho-mortero se le asigno resistencias menores para tener en cuenta la mayor porosidad y la menor adherencia respectivamente.

Fase **Material**	G_c $[N/mm]$	l_0 $[mm]$
Mortero	0.064	2.5
Interfaz Agregado-Mortero	0.044	2.5
Interfaz Caucho-Mortero	0.037	2.5

Tabla 1: Parámetros adoptados para definir el comportamiento a la fractura utilizando el MCF.

Para este modelo se utilizó un enfoque de integración de tiempo implícito.

3.3. MODELO DE PLASTICIDAD CON DAÑO DEL HORMIGÓN

El mortero, la interfaz agregado-mortero y la interfaz caucho-mortero se modelan utilizando el MPDH [2], que tiene en cuenta los parámetros de plasticidad, así como el desarrollo de daño en el material. Para utilizar el MPDH, es necesario definir los siguientes parámetros: el ángulo de dilatación (ψ), que se fija en $31°$; la excentricidad del potencial de flujo (ε), que tiene un valor de 0.1; y la relación entre la tensión de fluencia de compresión equibiaxial inicial y la tensión de fluencia de compresión uniaxial inicial (σ_{b0}/σ_{c0}), que se define como 1.16; la relación entre el segundo invariante de tensiones en el meridiano de tracción y el correspondiente al meridiano de compresión (K_c), con un valor de 0.667; y el parámetro de viscosidad (μ) establecido en 0.005.

La densidad (ρ) y la resistencia a la tracción (f_{t0}) adoptados se muestran en la Tabla 2.

Fase **Material**	ρ $[kg/m^3]$	f_{t0} $[MPa]$
Agregado Grueso	2650	-
Mortero	3150	9.5
Interfaz Agregado-Mortero	3150	6.6
Caucho	1300	-
Interfaz Caucho-Mortero	3150	4.3

Tabla 2: Parámetros mecánicos adoptados en las simulaciones numéricas del MPDH.

Las fases mortero, interfaz agregado-mortero y interfaz caucho-mortero se asumen con un comportamiento elástico lineal hasta alcanzar la resistencia a la tracción, asignándole una energía de fractura de 0,04 N/mm al mortero y de 0,02 N/mm a las interfaces. Estos valores

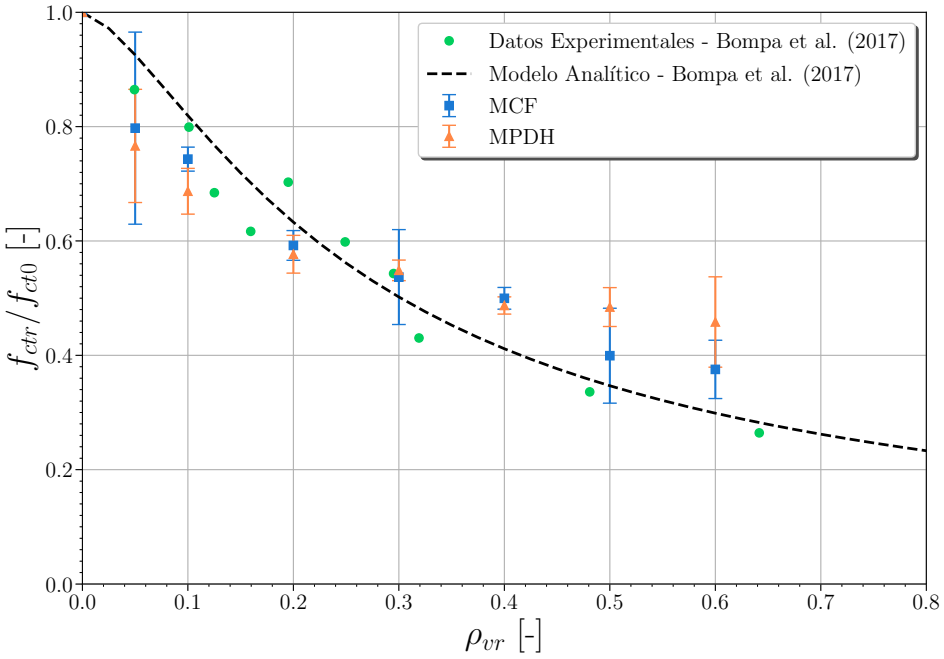


Figura 1: Resistencia a la tracción normalizada vs. relación volumétrica de caucho: comparación entre datos experimentales, modelo analítico, modelos MCF y MPDH.

se adoptaron siguiendo otros análisis mesoscópicos [7].

Para evitar los problemas de convergencia característicos del MPDH en problemas de multifragmentación, se utilizó un método de integración temporal explícito.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar el análisis comparativo de los modelos, se realizaron tres simulaciones para cada porcentaje de sustitución de agregado grueso por caucho, tanto en el MPDH como en el MCF. Se obtuvieron los valores máximos de tensión para cada una de las simulaciones y se realizó un análisis para evaluar la sensibilidad de los resultados del modelo a alteraciones en el tamaño de malla.

4.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DIRECTA

La Fig. 1 muestra los resultados numéricos de la resistencia a la tracción en función de la relación volumétrica de caucho. Luego, estos se comparan con los datos experimentales y la predicción analítica correspondiente (Eq. (1)) [5]. Los valores de resistencia se han normalizado con respecto a la resistencia del hormigón sin caucho.

Es evidente que se observa una disminución de la resistencia predominantemente en el 20 por ciento inicial de reemplazo, con una reducción de hasta el 40 por ciento. Se observa que los resultados obtenidos por el MCF son más próximos a los valores medios de los resultados experimentales y la curva analítica en comparación con los valores obtenidos con el MPDH.

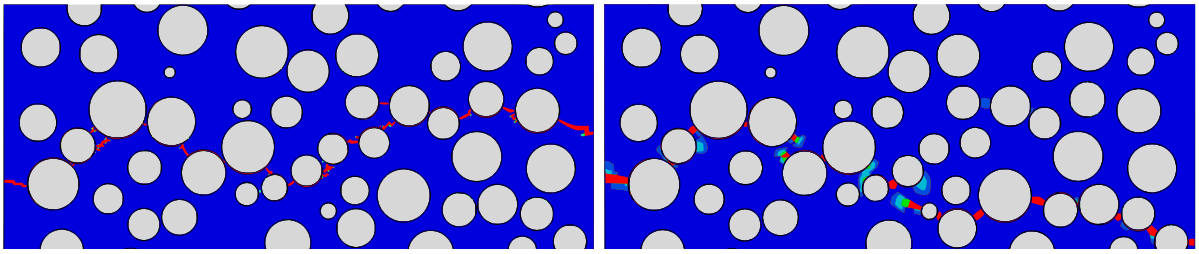
4.2. SENSIBILIDAD AL TAMAÑO DE MALLA

Para investigar la influencia del tamaño de la malla en los resultados de las simulaciones se aplicó cuatro tamaños de malla diferentes (0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm) a una simulación seleccionada ($\rho_{vr} = 0{,}20$.) y se observaron los cambios resultantes en el costo computacional, los patrones de grietas y la resistencia a la tracción.

La Tabla 3 presenta la variación en los tiempos de la Unidad Central de Procesamiento (CPU), expresados en segundos, como una función del cambio en el tamaño de la malla para ambos modelos. El tiempo de procesamiento para todos los tamaños de malla es más largo en el MPDH. Esta discrepancia es más pronunciada para los tamaños de malla más pequeños.

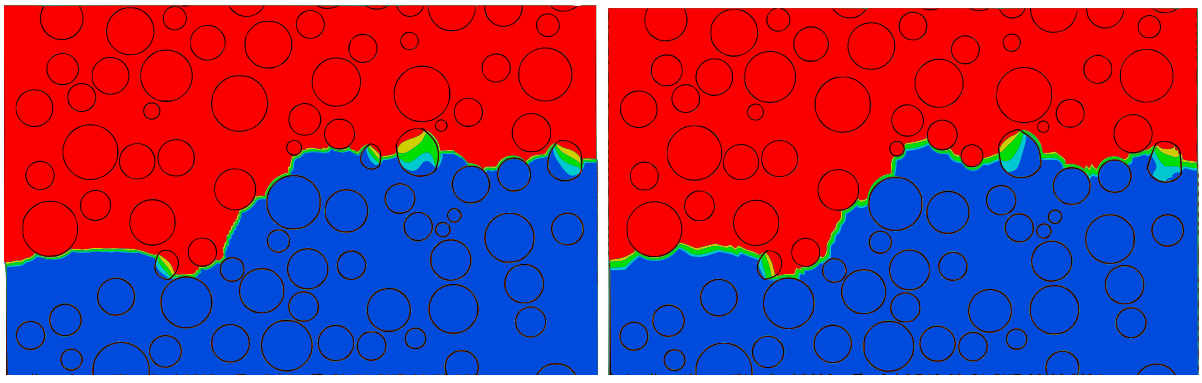
Modelo	**Tamaño de malla [mm]**			
Numérico	**0.3**	**0.5**	**0.7**	**1.0**
MCF	11894	10360	4251	3492
MPDH	20813	11853	5565	3950

Tabla 3: Tiempo de la CPU, en segundos, para distintos tamaños de malla (MCF y MPDH).



(a) (b)

Figura 2: Patrón de fisura para dos tamaños de malla con el MPDH: (a) 0.3 mm, (b) 1.0 mm



(a) (b)

Figura 3: Patrón de fisura para dos tamaños de malla con el MCF: (a) 0.3 mm, (b) 1.0 mm

Las figuras 2 y 3 muestran algunos patrones de grietas obtenidos para el MPDH y el MCF, respectivamente. Para el MPDH, se observó que la trayectoria de la grieta difiere dependiendo de la malla utilizada. Por el contrario, la trayectoria de la grieta para el MCF no tiene una dependencia con el tamaño de la malla, para el rango de tamaños de elementos considerado.

La Tabla 4 presenta la variación de la resistencia a la tracción normalizada con respecto al valor de resistencia obtenido para la malla más fina de 0.3 mm. Se puede observar que ambos modelos demuestran una convergencia satisfactoria en los valores de resistencia a la tracción.

Modelo	**Tamaño de malla [mm]**			
Numérico	**0.3**	**0.5**	**0.7**	**1.0**
MCF	1.000	1.003	1.006	1.004
MPDH	1.000	1.000	1.004	1.035

Tabla 4: Resistencia a tracción normalizada ($f_{ctr}/f_{ctr,0,3mm}$) para distintos tamaños de malla: comparación entre MCF y MPDH.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se propuso e implementó un modelo 2D a escala mesoscópica para simular ensayos a tracción de probetas de hormigón reforzado con caucho, empleando el MCF. Las predicciones del modelo propuesto fueron validadas con resultados experimentales y analíticos presentados por otros autores, mostrando que el modelo propuesto es capaz de predecir la resistencia a tracción con razonable precisión.

A su vez el modelo propuesto se comparó con otro modelo numérico basado en el MPDH. Se pudo ver que el MCF presenta una menor dependencia con respecto al tamaño de la malla en la predicción del patrón de fisuración y una eficiencia computacional superior a la del MPDH, en particular cuando se emplearon tamaños de malla más finos. Se pudo ver que el MCF converge más rapidamente a la solución. En conclusión, esta investigación demuestra el potencial de la herramienta propuesta para el diseño de este tipo de hormigones.

Referencias

[1] Md Shahjalal, Kamrul Islam, Farnaz Batool, Mohammad Tiznobaik, FM Zahid Hossain, Khondaker Sakil Ahmed, M Shahria Alam, and Raquib Ahsan. Fiber-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 404:133233, 2023.

[2] Karlsson Hibbitt and Sorensen. *Abaqus Explicit v6.13 User's Manual*. Abaqus Inc., Richmond, USA, version 6.13 edition, 2013.

[3] J Jurado, NM Zubiarrain, EI Villa, CG Rocco, and M Braun. Mesoscale modelling of the mechanical behaviour of concrete with rubber as coarse aggregate. *Engineering Fracture Mechanics*, 291:109533, 2023.

[4] Emilio Martínez Pañeda. Abaqus uelmat subroutine for implementing phase field fracture, apr 2022.

[5] DV Bompa, AY Elghazouli, B Xu, PJ Stafford, and AM Ruiz-Teran. Experimental assessment and constitutive modelling of rubberised concrete materials. *Construction and Building Materials*, 137:246–260, 2017.

[6] X Li and Y Xu. Phase field modeling scheme with mesostructure for crack propagation in concrete composite. *International Journal of Solids and Structures*, 234:111259, 2022.

[7] Y Huang, Z Yang, W Ren, G Liu, and C Zhang. 3d meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ x-ray computed tomography images using damage plasticity model. *International Journal of Solids and Structures*, 67:340–352, 2015.

IMPLEMENTACIÓN DE UN ANÁLISIS MECÁNICO INCREMENTAL EN ABAQUS UTILIZANDO UNA SUBRUTINA UMAT

Felix M. Arrese Igor[a], Julián E. Jurado[a], Edgardo I. Villa[a], Claudio G. Rocco[a], María P. Zappitelli[a],

[a] Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
email: julian.jurado@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Hormigón, Análisis termo-mecánico, UMAT, MEF.

1. INTRODUCCIÓN

Al momento de simular problemas que tienen condiciones dependientes del tiempo resulta importante realizar un análisis incremental de las tensiones. El módulo de elasticidad del hormigón presenta una fuerte evolución en el tiempo a edad temprana, periodo en el cual también el hormigón sufre una contracción térmica, debido a los gradientes de masa y de superficie que se generan como consecuencia del calor liberado durante el fraguado [1]. Este fenómeno presenta mayor importancia en estructuras de hormigón masivo donde los cambios volumétricos mencionados anteriormente generan la aparición de tensiones de tracción, que si superan la resistencia a tracción del material pueden ocasionar fisuras que afectan la capacidad resistente de la estructura y su durabilidad [2, 3].

En este trabajo se presentan los resultados de un análisis numérico realizado mediante una subrutina UMAT (User-Defined Material) implementada en el software comercial de elementos finitos Abaqus. La implementación de este código permite llevar a cabo un análisis incremental de las tensiones. El estudio se centra en el análisis tensional debido a gradientes de masa en el hormigón, comparando los resultados obtenidos con un modelo basado en expresiones analíticas proporcionadas por el American Concrete Institute (ACI) y con un modelo en Abaqus sin la subrutina UMAT

2. PROBLEMA ANALIZADO

El presente estudio se centra en la simulación numérica bidimensional de un elemento masivo de hormigón de dimensiones: 3.20×1.95 m^2, el cual se apoya sobre otro elemento de hormigón preexistente de dimensiones: 6.80×0.90 m^2, empotrado en su base, como se muestra en la Fig. 1. El bloque superior está sometido a una contracción debido a una variación en su temperatura uniforme en toda su masa, pero variable en el tiempo, según se muestra en la Fig. 2. El bloque inferior tiene una temperatura inicial de 10°C. El análisis se realiza en condiciones de deformación plana.

El hormigón se modela mediante un modelo constitutivo elástico lineal e incorpora las siguientes propiedades mecánicas elásticas: Para el elemento preexistente, el modulo de elasticidad E_f es de 44000 MPa y un coeficiente de poisson ν de 0.2. El bloque superior presenta un módulo de elasticidad $E_c(t)$ variable en el tiempo según la Ec. 1 y un coeficiente de poisson de 0.2.

$$E_c(t) = \beta_{cc}(t) E_{c28} \tag{1}$$

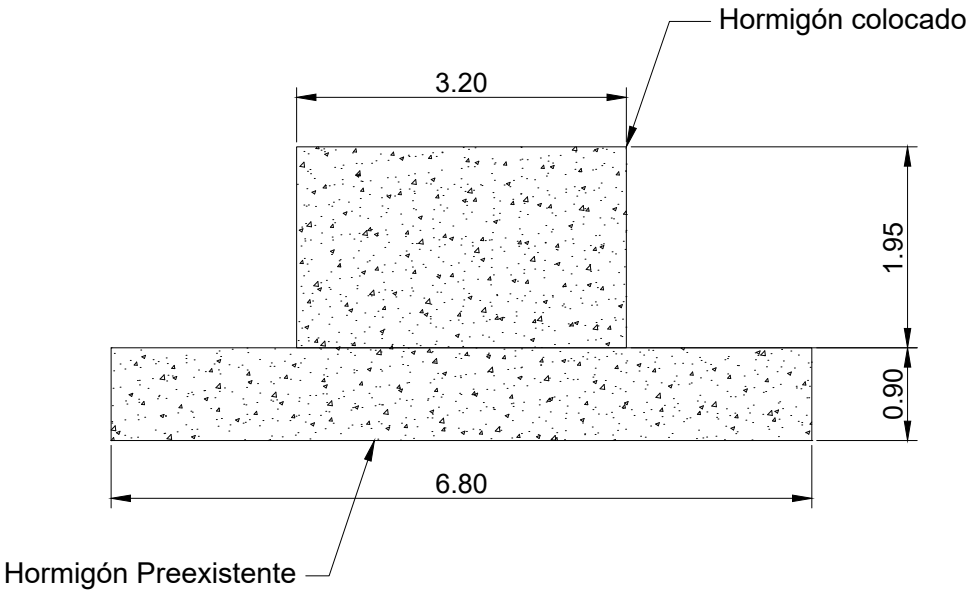


Figura 1: Geometría del modelo bidimensional.

Donde E_{c28} = 42411 MPa es el módulo de elasticidad a 28 dias del hormigón y β_{cc} tiene la siguiente expresión:

$$\beta_{cc}(t) = e^{\lambda(1-\frac{28}{t/t_1})^{\frac{1}{2}}} \tag{2}$$

Donde λ y t_1 son dos factores de ajuste que dependen del tipo de cemento, para nuestro caso λ = 0.38 y t_1 = 1 día. También fue necesario definir la densidad ρ y el coeficiente de expansión α para cada bloque. Los valores adoptados se muestran en la Tabla 1.

Elemento	ρ $[ton/m^3]$	α $[1/°C]$
Hormigón preexistente	2.42	1.00×10^{-05}
Hormigón colocado	2.42	1.00×10^{-05}

Tabla 1: Parámetros adoptados para cada bloque de hormigón.

3. MODELO NUMÉRICO Y MODELO SEMIANALÍTICO

El presente trabajo compara los resultados obtenidos en Abaqus sin subrutina UMAT, Abaqus con subrutina UMAT y mediante un cálculo semianalítico haciendo uso de las expresiones proporcionadas por el ACI para calcular las tensiones producidas por gradientes de masa en una estructura de hormigón masivo.

3.1. EXPRESIÓN DEL ACI

El ACI [4] proporciona una metodología para calcular las tensiones que se generan en un elemento de hormigón masivo cuando está sometido a un cambio de volumen y se encuentra restringido inferiormente. Se define el grado de restricción K_r como la relación entre la tensión real resultante del cambio de volumen f_t y la tensión que se produciría si estuviera totalmente restringido ($f_r = \Delta_c E$). De esta relación se deduce la siguiente expresión:

$$f_t = K_r \Delta_c E \tag{3}$$

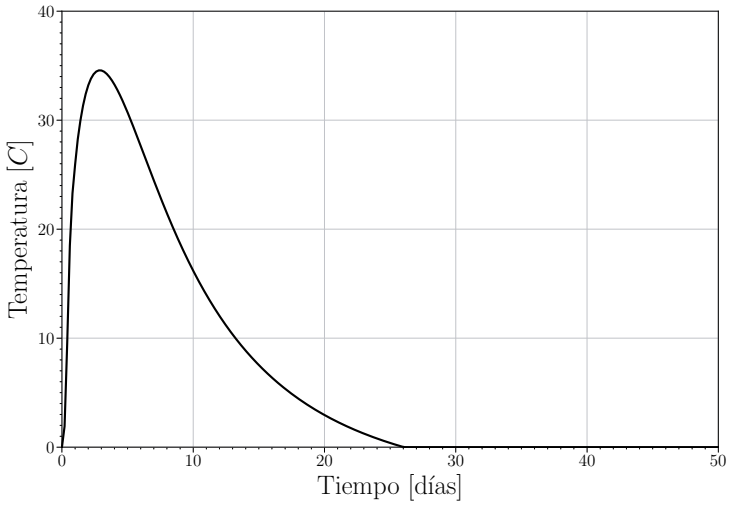


Figura 2: Curva de temperatura impuesta en el elemento de hormigón superior.

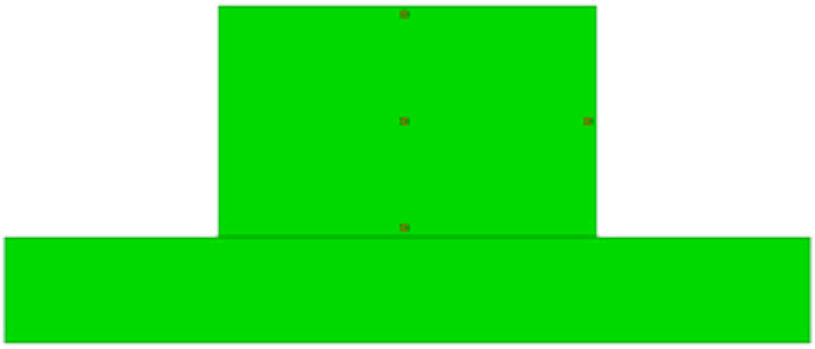


Figura 3: Elementos seleccionados para el análisis de tensiones en el bloque superior.

Donde Δ_c representa la deformación sin restricción y E es el módulo de elasticidad del hormigón en el instante en que ocurre la deformación Δ_c. Aplicando esta ecuación de manera incremental al bloque superior de hormigón del problema en estudio, se obtiene que, para cada instante de tiempo i:

$$E = E_c(t) = E_{ci}; \Delta_{ci} = \alpha \Delta T_i \tag{4}$$

Donde ΔT_i surge de la discretización, en pequeños incrementos de temperatura, de la curva de la Fig. 2 y α es el coeficiente de expansión. Por lo tanto, la tensión en un instante i dado se calcula como:

$$f_{ti} = f_{ti-1} + K_{ri} \alpha \Delta T_i E_{ci} \tag{5}$$

El parámetro K_r depende principalmente de las dimensiones relativas, el modulo de elasticidad del hormigon y del material de restricción sobre el cual se apoya. Para nuestro problema en estudio las dimensiones y el modulo de elasticidad del material de restricción (E_f) son constantes, mientras que el módulo de elasticidad del bloque superior de hormigón es variable en el tiempo ($E_c(t)$). Para establecer una expresión que relacione K_r con la razón de módulos de elasticidad E_c/E_f, se realizaron simulaciones en Abaqus con las mismas dimensiones del problema en estudio, pero variando la relación E_{c0}/E_{f0}. En cada modelo, se aplicó una

contracción uniforme al bloque superior mediante una variación de temperatura de -10°C y al bloque inferior se le asignó una temperatura inicial de 0°C. A partir de estos modelos, se determinaron las tensiones f_{t0} en cuatro elementos de interés de la malla de elementos finitos (Ver Fig. 3). Luego se calculo analiticamente el valor de la tension f_{r0} para un volumen de hormigón completamente restringido sometido a la misma contracción, utilizando la expresión:

$$f_{r0} = \alpha \Delta T E_{c0} \tag{6}$$

Donde ΔT = -10°C. Finalmente, el valor de K_r se obtuvo como:

$$K_r = \frac{f_{t0}}{f_{r0}} \tag{7}$$

Los valores de K_r calculados para los cuatro elementos de la malla se muestran en la Fig. 4. Estas curvas se utilizaron para calcular las tensiones segun la Ec. 5.

3.2. SUBRUTINA UMAT

Para implementar el cálculo incremental de tensiones en el software de elementos finitos Abaqus, se utilizó una subrutina UMAT. Este tipo de subrutina permite definir cualquier modelo de comportamiento mecánico del material que no esté incluido en la biblioteca de materiales de Abaqus.

Para cada iteración ABAQUS pasa a la subrutina las tensiones al comienzo de la iteración σ_{i-1}, las deformaciones al comienzo de la iteración ε_{i-1} y el incremento de deformaciones previsto $\Delta\varepsilon_i$. A partir de estos valores, la subrutina calcula y devuelve a Abaqus la matriz jacobiana D_{DP} y las tensiones actualizadas σ_i. La expresión utilizada en la subrutina para actualizar las tensiones es:

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + D_{DP} \Delta\varepsilon_i \tag{8}$$

Donde la matriz jacobiana se actualiza en cada iteración debido a la variación del módulo elástico del material. Su expresión es la siguiente:

$$D_{DP} = \frac{E_c(t)(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

La subrutina fue programada en Fortran.

4.RESULTADOS

Para el análisis comparativo, se evaluaron las tensiones en cuatro elementos de interés de la malla de elementos finitos del bloque superior: un elemento inferior, uno superior, uno central y otro lateral, como se muestra en la Figura 3. Este análisis se llevó a cabo para ambos modelos numéricos: Abaqus con y sin la subrutina UMAT. Además, se calcularon las tensiones en los mismos elementos utilizando la expresión proporcionada por el ACI, según lo detallado en el apartado 3.1.

La Figura 5 presenta las tensiones obtenidas mediante los tres enfoques para los cuatro elementos analizados. Se observa que el modelo de Abaqus sin la subrutina UMAT muestra tensiones nulas después del día 25, lo que coincide con el momento en que la curva de temperatura aplicada retorna a su valor inicial de 0. Esto sugiere que Abaqus, al no realizar un análisis incremental, interpreta que si la variación de temperatura respecto a la condición inicial es nula, entonces no hay tensiones residuales. Sin embargo, esta suposición ignora el

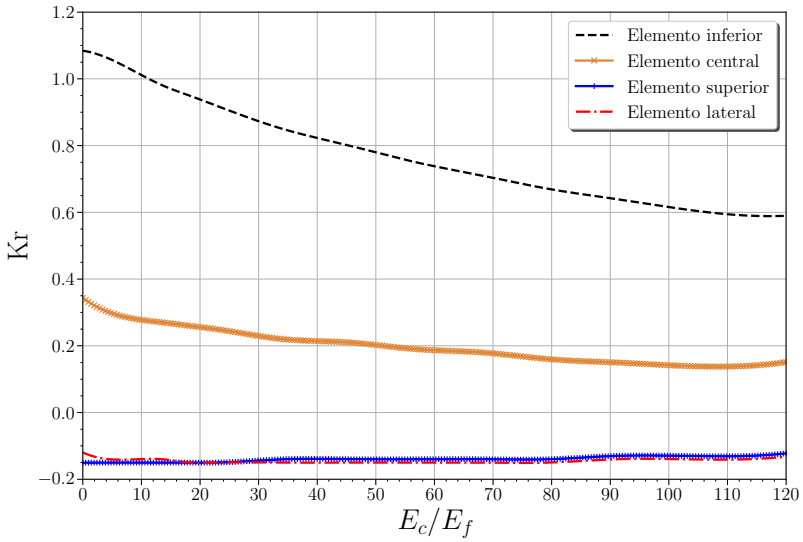


Figura 4: Variación del coeficiente de restricción K_r en función de la relación E_c/E_f para los distintos elementos analizados.

hecho de que la rigidez del hormigón varía a lo largo del proceso de contracción. Además, en todos los casos, este modelo presenta un pico de tensión mayor en comparación con los otros dos modelos evaluados.

Por otro lado, los resultados del modelo en Abaqus con subrutina UMAT y el modelo semianalítico basado en el ACI muestran una coincidencia en todos los casos. Ambos modelos presentan un pico de tensión inicial menor en comparación con el modelo de Abaqus sin subrutina UMAT. En particular, si analizamos el nodo inferior, se observa que las compresiones iniciales inducidas por el calentamiento de la masa, debido a la restricción externa, generan un pico menor. Esto se debe a que, en este período, el módulo de elasticidad del hormigón es aún bajo, lo que modera las tensiones desarrolladas en la fase temprana.

En general, los resultados obtenidos permiten concluir que la implementación de la subrutina UMAT en Abaqus es fundamental para capturar de manera más precisa la evolución de las tensiones en el hormigón durante el proceso de hidratación y enfriamiento. Además, la coincidencia entre el modelo semianalítico ACI y el modelo Abaqus con UMAT valida la precisión del enfoque propuesto, destacando la importancia de considerar la evolución del módulo de elasticidad en el análisis estructural de elementos masivos de hormigón.

5. CONCLUSIÓN

El análisis realizado demuestra la importancia de considerar un enfoque incremental para la evaluación de tensiones en estructuras de hormigón masivo. La implementación de la subrutina UMAT en Abaqus permitió capturar con mayor precisión la evolución de las tensiones a lo largo del tiempo, en contraste con el modelo sin UMAT, que no reflejó adecuadamente los efectos de la variación del módulo de elasticidad y presentó tensiones nulas después de la estabilización térmica.

Asimismo, la comparación con el modelo semianalítico basado en el ACI mostró una alta concordancia con los resultados obtenidos mediante Abaqus con UMAT, validando la efica-

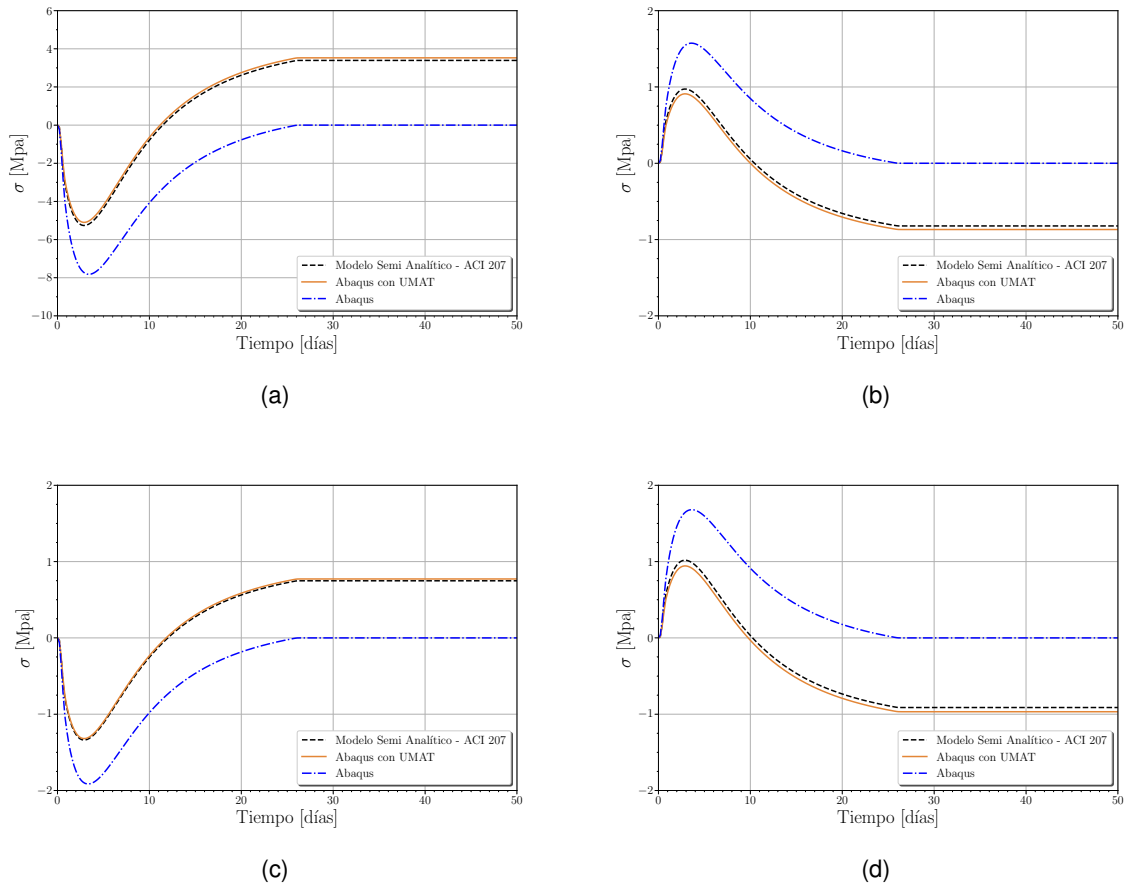


Figura 5: Evolución de las tensiones en los elementos seleccionados del modelo numérico a lo largo del tiempo, comparando los tres enfoques de análisis: (a) Elemento Inferior, (b) Elemento Superior, (c) Elemento Central, (d) Elemento Lateral.

cia de este enfoque numérico. Se concluye que la consideración de la evolución del módulo de elasticidad es fundamental para evitar la subestimación de tensiones residuales y prever posibles fisuraciones en estructuras de hormigón sometidas a gradientes de masa.

Referencias

[1] Povindar K Mehta and Paulo Monteiro. *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1998.

[2] ACI Committee. *Cement and concrete terminology*, volume 19. The Institute, 1978.

[3] Ippei Maruyama and Pietro Lura. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*, 123:105770, 2019.

[4] ACI Committee 207. Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete. American Concrete Institute, 2007.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LIGANTES RECUPERADOS CON INCORPORACIÓN DE ASFALTOS ALTAMENTE MODIFICADOS

Uguet, Martín Ezequiel, Larsen Diego Omar, Frígoli Elisa, Arrizabalaga Gastón, Fracassi Luciana, Mampazo Elisa.

Unidad de Investigación. y Desarrollo Ingeniería Civil (UIDIC) Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. La Plata – Argentina. 48 y 115
e-mail: uidic@ing.unlp.edu.ar

Resumen
La tendencia actual es buscar la reutilización de las capas asfálticas para generar un sistema de construcción más sustentable en el área de la pavimentación, debido a que el asfalto es un recurso no renovable. Si bien existen agentes que actúan como rejuvenecedores del ligante, sólo buscan el retorno a las propiedades originales del material. Sin embargo, en muchos casos, al ejecutar nuevas capas de pavimento, se requieren mejoras en las propiedades reológicas del ligante para obtener mezclas asfálticas de alta performance, reemplazándolo totalmente por un asfalto modificado. En este estudio, se presentan distintos casos de ligantes asfálticos recuperados de RAP (Pavimentos Asfálticos Reciclados), a los que se les incorporó una pequeña cantidad de asfalto altamente modificado con polímeros (HIMA), para alcanzar las propiedades de un asfalto modificado. De esta manera, se evitaría el reemplazo de la capa de pavimento existente, ya que la misma sería aprovechada reciclando y generando asfaltos que presenten una buena respuesta a las altas solicitaciones. Se estudiaron distintas tasas de incorporación de asfalto provenientes de RAP y de ligante asfáltico altamente modificado (HIMA). Se evaluaron las mezclas desde su comportamiento más básico, hasta su aspecto reológico, probando así que se trata de una alternativa viable en obra.

Introducción

La construcción de rutas de pavimentos asfálticos, requiere la utilización de recursos no renovables, como lo son los agregados pétreos y los ligantes asfálticos. Desde la comunidad vial, se ha tomado consciencia de esta situación y a lo largo del tiempo se ha intentado reutilizar los materiales de manera de optimizar los recursos. Una forma de hacerlo es mediante el diseño de mezclas asfálticas con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).
Si bien la utilización de RAP resulta una alternativa interesante, actualmente su uso condiciona las propiedades de la nueva mezcla asfáltica producida. En otras palabras, el nuevo material posee las características aportadas por el asfalto de origen, situación que limita el cálculo de paquetes de refuerzo en rutas y caminos ya que para tránsitos elevados se requiere de asfalto modificado con polímeros (que además presenta un mejor comportamiento frente a diversos climas).
El HiMA (Higly Modified Asphalt) es un tipo de bitumen se encuentra altamente modificado. Sus propiedades pueden llegar a predominar por sobre el asfalto convencional proveniente del RAP y así alcanzar una mezcla con las características propias de un asfalto modificado o de alta perfomance. Su uso implicaría alcanzar las propiedades de un betún modificado, adicionando una pequeña proporción de asfalto HiMA, por lo cual no sería necesario el reemplazo de la capa de pavimento a tratar. Este trabajo se desarrolló solamente a nivel de ligantes asfálticos.

Parte experimental resultados y discusión

Inicialmente, se procedió a adicionar asfalto altamente modificado con polímeros (HiMA) a distintos asfaltos envejecidos, provenientes de la recuperación del ligante del RAP. Previamente, cada uno de los materiales intervinientes fueron caracterizados en forma individual.

RAP

Se tomaron muestras de RAP provenientes de mezclas asfálticas convencionales pertenecientes a diferentes rutas de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). La recuperación del ligante de las mezclas asfálticas se realizó bajo la norma argentina IRAM 6851-1 “Metodo del Rotovapor”. Además, sobre dichas muestras se evaluaron diferentes parámetros para su caracterización: perfil de viscosidad (IRAM 6837), recuperación elástica torsional (IRAM 6830), módulo complejo a 58 ºC (AASHTO T315), determinación de temperatura máxima de PG (Performance Grade) y MSCR (Multi Stress Creep Recovery) a 60º C (AASHTO T350). Si bien el ensayo de MSCR se realiza bajo norma a muestras ensayadas luego de RTFOT (Rollin Film Thin Oven Test) IRAM 6839, en este caso se la utilizó para determinar el grado de modificación del material.

Los distintos Ligantes Asfálticos Recuperados (LAR), presentaron distintas características, especialmente en su grado de envejecimiento. En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos.

Ensayos		**Ligantes Asfálticos Recuperados (LAR)**		
		LAR 1	**LAR 2**	**LAR 3**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	60º C	7597	69083	35475
	135 ºC	7,6	24,3	173
	150 º C	3,5	9,9	60,9
	170 º C	1,5	3,7	22,7
Punto de ablandamiento [º C]		58,0	71,5	79,5
Recuperación elástica por torsión [%]		0	0	0
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		70	88	100
G* 58ºC [kPa]		1,64	52,9	128
δ 58ºC [º]		86,4	72,0	52,6
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]	0,920	0,138	0,006
	$R_{3,2}$ [%]	27,5	25,6	82,5

Tabla 1. Ensayos sobre LAR



Figura 1. Creep compliance no recuperable vs porcentaje de recuperación a 60 ºC. Ligante Asfáltico Recuperado

Los valores de MSCR fueron volcados en un gráfico Jnr3,2 vs %R3,2, en función de lo establecido en la norma AASHTO M332 (ver Figura 1). Allí se establece que, los valores que se encuentren por encima de la curva de la ecuación 1, se corresponden con ligantes

asfálticos modificados con polímeros, mientras que aquellos que se encuentren por debajo, no lo son.

$$\%R_{3,2} = 29{,}371 \times {Jnr_{3,2}}^{-0{,}2633} \quad (1)$$

Donde $\%R_{3,2}$ se corresponde con el porcentaje de recuperación a 3,2 kPa y $Jnr_{3,2}$, se refiere a la creep compliance no recuperable a 3,2 kPa.

HiMA

En este estudio se utilizó un asfalto HiMA elaborado en laboratorio con un mezclador Silverson, siguiendo un protocolo interno para asegurar la adecuada dispersión del polímero, en este caso, un 8% en peso de SBS Kraton 243. Esta mezcla provoca un cambio en la estructura intermolecular del ligante, esencial para calificarlo como altamente modificado. El SBS forma la matriz continua, mientras que las moléculas de asfalto constituyen la fase dispersa, creando agrupaciones coloidales. Estos ligantes asfálticos presentan altas recuperaciones elásticas y excelente comportamiento frente a la fatiga y bajas temperaturas. Tras obtener el asfalto HiMA, se realizó su caracterización, determinando parámetros como recuperación elástica torsional, recuperación elástica lineal (IRAM 6832), perfil de viscosidad, módulo complejo y ángulo de desfasaje a 58 ºC y MSCR a 60ºC, cuyos resultados se detallan en la Tabla 2.

Ensayos		**Ligante Asfáltico HiMA (obtenido en laboratorio)**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	135º C	59,0
	150 ºC	19,7
	170 º C	6,0
	190 º C	2,5
Punto de ablandamiento [ºC]		78,0
Recuperación elástica por torsión [%]		84
Recuperación elástica lineal [%]		61
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		88
G* 58ºC [kPa]		7,56
δ 58ºC [º]		60,0
Luego de RTFOT		
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa-1]	0,199
	$R_{3,2}$ [%]	73,82

Tabla 2. Ensayos sobre HiMA

Se llevaron a cabo distintas mezclas de asfaltos HiMA con cada uno de los ligantes recuperados, provenientes del RAP, denominados LAR en este estudio. Se efectuaron distintas proporciones de mezcla, en peso, según el siguiente detalle: En primera instancia se mezcló un 20% de HiMA con 80% de LAR, y luego se incrementó la proporción de HiMA: 40% HiMA – 60% LAR, para todos los ligantes. Asimismo, para los LAR 2 y LAR 3, se efectuaron dos mezclas más: HiMA: 60% HiMA – 40% LAR y HiMA: 80% HiMA – 20% LAR. En estas últimas proporciones no se aplicaron al LAR 1, debido a que a la hora de analizar su envejecimiento (según las viscosidades informadas en la Tabla 1), pudo observarse que el mismo no se encontraba con la oxidación suficiente que se pretende estudiar en el presente, por lo que mayores porcentajes de HiMA sería innecesario.

La nomenclatura adoptada será LAMxhh-rr, donde la x se corresponde al LAR utilizado (1, 2 y 3) y hh-rr al porcentaje de la proporción (hh al porcentaje de HiMA y rr al porcentaje de LAR. Sobre dichas muestras obtenidas por mezclado, se realizaron diferentes ensayos para la caracterización del material: perfil de viscosidad, punto de ablandamiento (IRAM 6841),

recuperación elástica torsional recuperación elástica lineal, determinación de módulo complejo y ángulo de desfasaje a 58 º C y MSCR a 60 ºC (este último luego de RTFO). Asimismo, se realizó la determinación del perfil de viscosidad de los LAM luego de RTFO. En la Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos.
Por otro lado, y para una mejor lectura, se elaboraron gráficos donde se presentan los resultados para los distintos LAM de los resultados obtenidos del ensayo de MSCR a 60 ºC luego de RTFO. Los mismos se presentan en las Figuras 3, 4, 5 y 6.

Ensayos		LAM (Ligante Asfáltico Mezclado)		
		LAM 1_{20-80}	**LAM 2_{20-80}**	**LAM 3_{20-80}**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	135º C	8,8	25,0	138
	150 ºC	4,1	10,2	45,5
	170 º C	1,8	4,1	14,5
	190 º C	1,0	2,0	6,0
Punto de ablandamiento [ºC]		62,3	73,1	84,1
Recuperación elástica por torsión [%]		30	18	27
Recuperación elástica lineal [%]		31,5	37,7	27,0
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		70	88	<58
G* 58ºC [kPa]		7,37	41,8	0,11
δ 58ºC [º]		78,7	70,9	42,3
Luego de RTFOT				
G* 58ºC [kPa]		22,1	69,1	123,0
δ 58ºC [º]		73,7	66,4	52,0
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]	0,383	0,063	0,006
	$R_{3,2}$ [%]	23,16	48,01	84,42

Tabla 3. Ensayos sobre LAM20-80

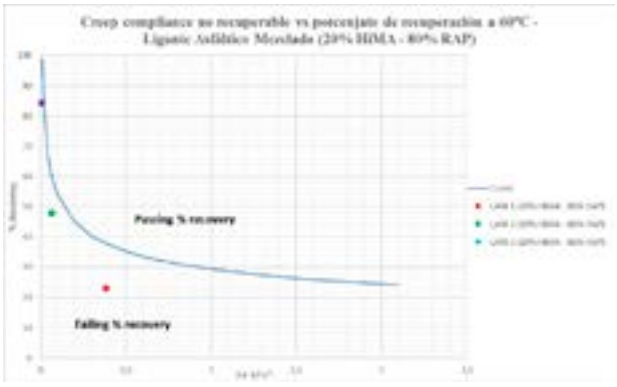


Figura 3. Creep compliance no recuperable vs porcentaje de recuperación a 60 ºC. Ligante Asfáltico Mezclado (20% HiMA – 80% RAP)

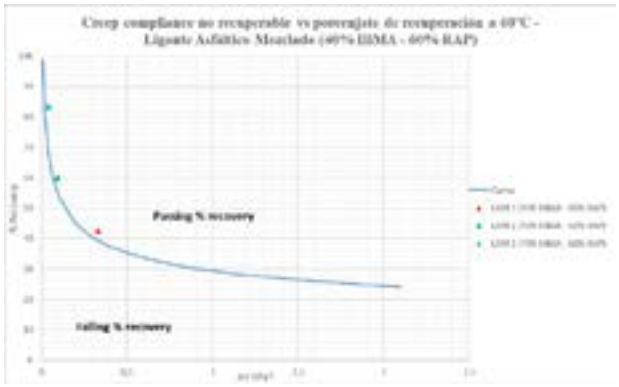


Figura 4. Creep compliance no recuperable vs porcentaje de recuperación a 60 ºC. Ligante Asfáltico Mezclado (40% HiMA – 60% RAP)

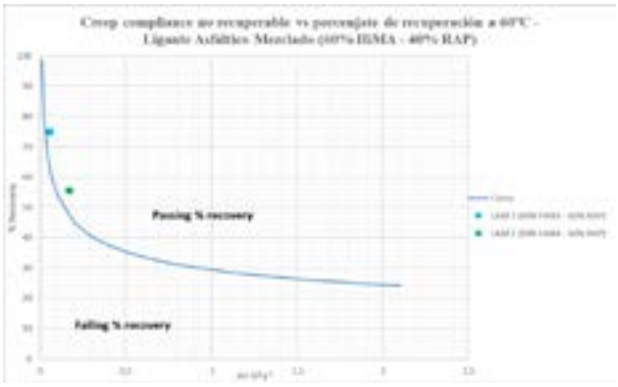


Figura 5. Creep compliance no recuperable vs porcentaje de recuperación a 60 ºC. Ligante Asfáltico Mezclado (60% HiMA – 40% RAP)

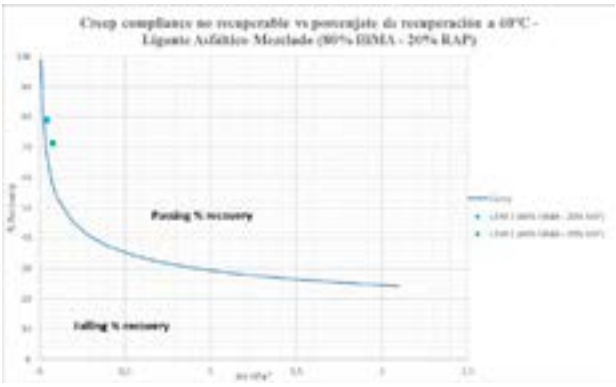


Figura 6. Creep compliance no recuperable vs porcentaje de recuperación a 60 ºC. Ligante Asfáltico Mezclado (80% HiMA – 20% RAP)

Ensayos		LAM (Ligante Asfáltico Mezclado)		
		LAM $1_{40\text{-}60}$	**LAM $2_{40\text{-}60}$**	**LAM $3_{40\text{-}60}$**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	135º C	15	21	154
	150 ºC	6	9	43
	170 º C	3	4	13
	190 º C	1	2	9
Punto de ablandamiento [ºC]		71,8	72,6	86
Recuperación elástica por torsión [%]		36	64	59
Recuperación elástica lineal [%]		59,6	50,2	59,0
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		76	88	<58
G* 58ºC [kPa]		9,95	28,2	0,39
δ 58ºC [º]		72,3	68,1	53,7
Luego de RTFOT				
G* 58ºC [kPa]		18,4	31,4	55,1
δ 58ºC [º]		70,3	63,6	55,9
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]	0,331	0,094	0,041
	$R_{3,2}$ [%]	42,54	60,2	83,59

Tabla 4. Ensayos sobre LAM40-60

Ensayos		LAM (Ligante Asfáltico Mezclado)		
		LAM $1_{60\text{-}40}$	**LAM $2_{60\text{-}40}$**	**LAM $3_{60\text{-}40}$**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	135º C	-	32	68
	150 ºC	-	12	30
	170 º C	-	5	10
	190 º C	-	2	4
Punto de ablandamiento [ºC]		-	89,6	86
Recuperación elástica por torsión [%]		-	79	59
Recuperación elástica lineal [%]		-	45,5	59,0
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		-	88	<58
G* 58ºC [kPa]		-	11,7	0,51

δ 58ºC [º]		-	57,7	98,7
Luego de RTFOT				
G* 58ºC [kPa]		-	2,63	3,93
δ 58ºC [º]		-	75,1	58,5
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]	-	0,169	0,0536
	$R_{3,2}$ [%]	-	55,68	74,94

Tabla 5. Ensayos sobre LAM60-40

Ensayos		LAM (Ligante Asfáltico Mezclado)		
		LAM 1_{80-20}	**LAM 2_{80-20}**	**LAM 3_{80-20}**
Perfil de viscosidad rotacional [dPa s]	135º C	-	39	65
	150 ºC	-	17	30
	170 º C	-	6	11
	190 º C	-	3	4
Punto de ablandamiento [ºC]		-	89,6	90,1
Recuperación elástica por torsión [%]		-	79	71
Recuperación elástica lineal [%]		-	45,5	50,3
Determinación PG (temp. superior) [ºC]		-	88	64
G* 58ºC [kPa]		-	11,7	7,08
δ 58ºC [º]		-	57,7	59,5
Luego de RTFOT				
G* 58ºC [kPa]		-	1,02	22,8
δ 58ºC [º]		-	78,4	53,1
MSCR 60 ºC	$Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]	-	0,0786	0,0459
	$R_{3,2}$ [%]	-	71,3	79,0

Tabla 6. Ensayos sobre LAM80-20

Conclusiones

Si bien se obtuvo cierta respuesta elástica con el LAM con 20% HiMA y 80% LAR el mismo alcanzó propiedades similares a las de un asfalto modificado con polímeros.

A partir de la utilización del 40% de asfalto altamente modificado, se obtuvieron nuevos ligantes con propiedades similares a la de un asfalto modificado con polímeros desde el punto de vista reológico.

Se observó que a medida que la proporción de HiMA va aumentando, se produce un aumento en el comportamiento elástico del material.

En función de lo observado en este estudio, puede concluirse que a partir de una capa de asfalto con HiMA), pueden lograrse propiedades de un asfalto modificado sin necesidad del reemplazo total de la capa. Esto se traduce en ahorros durante la construcción y un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

Se deberán continuar los estudios, a los efectos de estudiar el comportamiento al final de la vida útil del material. Para ello se realizarán ensayos de simulación de envejecimiento a largo plazo mediante PAV (Pressure Aging Vessel), con el objeto de estudiar ciertos parámetros.

Se ha planteado a diferentes organismos la realización de un tramo de prueba, a fin de corroborar el comportamiento el material en campo. El mismo está en proceso de aprobación.

Bibliografía

[1] AASHTO M332 (2023), Standard Specificaction for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery Test.

[2] BITAFAL, Asfaltos altamente modificados (HIMA).

[3] Zuluaga Gómez A. E., Gómez Cruz N., Correa Arroyave A., (2021), Desarrollo de un asfalto altamente modificado con polímero SBS a partir de un asfalto base convencional de la refinería Ecopetrol Barrancabermeja 60-70 variando la concentración de polímero, BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas.

EFECTO DE LAS FIBRAS EN EL DESPRENDIMIENTO EXPLOSIVO DE HORMIGONES DE RESISTENCIA CONVENCIONAL Y DE ALTA RESISTENCIA

Hours Francisco, Torrijos María Celeste, Giaccio Graciela

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería UNLP, calle 115 y 48, La Plata
franciscohours@gmail.com

RESUMEN

El hormigón expuesto a altas temperaturas puede sufrir desprendimientos explosivos, dando lugar a la pérdida de material, reducción del tamaño de la sección y exposición del acero de refuerzo a temperaturas excesivas. En este sentido, los hormigones de alta y ultra alta resistencia merecen especial atención debido a que poseen menor relación a/c, incorporan adiciones minerales y elevados contenidos de cemento, lo que resulta en materiales considerablemente menos permeables que el hormigón convencional, propiciando el desprendimiento explosivo. Se ha comprobado que la incorporación de microfibras poliméricas en el hormigón permite mitigar dicho efecto. Sin embargo, merecen mayor estudio la definición de la dosis necesaria y la influencia de las características de las fibras. En este trabajo se evalúan los efectos de la incorporación de micro y macrofibras sintéticas, fibras de acero y combinaciones híbridas en hormigones de 30 y 70 MPa expuestos a 500 y 700 °C. Con estos hormigones se elaboraron cilindros de 150 x 300 mm con distintas dosis de fibras que fueron expuestos a temperaturas de 500 y 700°C. Se evaluó el nivel de daño y tendencia al desprendimiento a través del relevamiento de fisuras y la medición de la velocidad de pulso ultrasónico como así también la respuesta mecánica. Mientras los hormigones sin fibras exhibieron desprendimientos explosivos, las probetas tanto con micro como con macro fibras no presentaron desprendimientos violentos de hormigón. Comparando los distintos hormigones con fibras, los que incorporaron macro fibras sintéticas presentaron el mayor nivel de daño, con mayor densidad y ancho de fisuras como así también menores resistencias y rigideces residuales. La incorporación de microfibras, aún en dosis de 0,6 kg/m^3, resultó altamente beneficiosa en el control de la fisuración por altas temperaturas.

INTRODUCCIÓN

El Hormigón de Alta Performance (HAP) se caracteriza por su alta resistencia y baja permeabilidad, lo que lo hace más durable que el hormigón convencional (HC). Sin embargo, debido a su baja permeabilidad, puede ser más susceptible al desprendimiento explosivo o “spalling” cuando se expone a un calentamiento rápido, lo cual podría comprometer la integridad estructural en caso de incendio. Los factores que influyen en este fenómeno son la permeabilidad, el nivel de saturación de agua, la velocidad de calentamiento, la resistencia a tracción y el tamaño de la sección del hormigón [1]. Los túneles, por su mayor humedad, tienen un mayor riesgo de sufrir este fenómeno. El “spalling” ocurre entre 190 y 250 ºC como consecuencia de un rápido ascenso de la presión de poros producto de la evaporación del agua y tensiones térmicas debido al gradiente de temperatura. Estos mecanismos pueden ocurrir individualmente o combinados [1-4]. Una medida de protección pasiva contra el “spalling” es el uso de micro fibras de polipropileno. La norma europea [5] recomienda una dosis de 2 kg/m³ de microfibras para minimizar el riesgo de desprendimientos explosivos, aunque dosis de 0,9 kg/m³ también han sido efectivas [2]. Estas fibras se funden a 170 ºC, creando canales interconectados que permiten aliviar la presión del vapor. Algunos estudios sugieren que la efectividad depende de la cantidad de fibras, mientras que otros afirman que las fibras deben gasificarse para crear dichos canales [6-8].

En un estudio sobre el uso combinado de fibras de polipropileno (12 mm de longitud) y fibras de acero (13 mm), se observó que el uso exclusivo de fibras de acero no controlaba el "spalling", mientras que con dosis mayores a 2 kg/m³ de fibras poliméricas se evitaba este fenómeno, aunque aparecían fisuras. Sin embargo, la combinación de fibras de polipropileno y acero evitaba desprendimientos explosivos sin causar fisuras [9]. Investigaciones posteriores confirmaron que la combinación de fibras de polipropileno y acero es eficaz para evitar estos desprendimientos en hormigones de alta resistencia [10]. Evaluaciones de losas de hormigón con fibras de polipropileno mostraron que las micro fibras monofilamento ofrecían una mayor resistencia al "spalling" que las fibriladas, mientras que el uso de fibras de acero no aportaba beneficio adicional [11]. Además, adiciones de 1,5 kg/m³ y 3,0 kg/m³ de micro fibras redujeron la presión intersticial a niveles similares al de los hormigones convencionales [12]. Por otro lado, Zhang [13] indicó que las fibras de acero pueden reducir el riesgo de desprendimientos explosivos al mejorar la conductividad térmica, la resistencia a tracción y al reducir la presión de poros a altas temperaturas.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el grado de protección frente a altas temperaturas que pueden ofrecer micro y macro fibras poliméricas, macro fibras de acero y sus combinaciones en hormigones convencionales y de alta performance. Aunque numerosos estudios han demostrado que las micro fibras protegen contra el "spalling", aún no hay consenso sobre la dosis adecuada.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

Se estudiaron dos hormigones de 30 y 70 MPa de resistencia a compresión, denominados A y B respectivamente, a los que se incorporaron distintas dosis y tipos de fibras. Las fibras utilizadas fueron: una microfibra sintética de 12 mm de longitud y 0,018 mm de diámetro, una macrofibra sintética de 50 mm de longitud y 0,6 mm de diámetro y una fibra de acero de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro. Empleando como base el hormigón A se elaboraron las siguientes mezclas: HS (hormigón sin fibras), m1 y m2 (hormigones con 1 kg/m^3 y 2 kg/m^3 de microfibra sintética respectivamente) y M3 y M6 (hormigones con 3 kg/m^3 y 6 kg/m^3 de macrofibra sintética). Por otro lado, con el hormigón B se elaboraron: HS (hormigón sin fibras), m0.6 y m1 (hormigones con 0.6 kg/m^3 y 1 kg/m^3 de microfibras sintéticas), M6 (hormigón con 6 kg/m^3 de microfibras sintéticas), y las combinaciones hibridas de fibra m0.6 S40 (hormigón con 0,6 kg/m^3 de microfibras sintética y 40 kg/m^3 de fibras de acero) y m0.6 M3 (hormigón con 0,6 kg/m^3 de microfibras sintética y 3kg/ m^3 de fibras de macrofibras sintéticas). Con cada hormigón se moldearon 9 cilindros de 150 x 300 mm que permanecieron en cámara húmeda durante tres meses y se retiraron 4 días antes de ser expuestos a alta temperatura.

Metodología de evaluación

Las probetas fueron calentadas progresivamente hasta alcanzar temperaturas máximas de 500 o 700ºC en un horno eléctrico con control automático de temperatura. Para registrar la velocidad de calentamiento, dada su importancia en el daño generado, se midió la evolución de la temperatura en el centro de una probeta de hormigón mediante una termocupla. Cuando el horno alcanzó la temperatura máxima (500 o 700ºC) se mantuvo por dos horas, luego se apagó y las probetas se enfriaron lentamente en su interior.

Para evaluar el daño en cada hormigón, antes y después de calentar las probetas, se determinó la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), una vez calentadas se realizó un relevamiento de la densidad y ancho máximo de fisuras visibles en la superficie de la probeta. Luego, las mismas probetas fueron ensayadas a compresión midiendo la resistencia y el módulo de elasticidad

RESULTADOS Y DISCUCIÓN

En la Tabla 1 se muestran los valores promedio de 3 determinaciones de VPU, resistencia a compresión (f'c) y módulo de elasticidad (E) antes y después de la exposición a 500 y 700°C, la densidad de fisuras y el ancho máximo de fisura promedio.

Evaluación del daño: velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y relevamiento de fisuras

Durante el calentamiento, cerca de los 200 °C los hormigones sin fibras (HS), de ambos niveles resistentes, exhibieron desprendimientos explosivos, y al continuar elevando la temperatura las probetas resultaron destruidas. Por el contrario, los hormigones reforzados con fibras, si bien presentaron diversos grados de fisuración, resistieron la acción de las altas temperaturas y no se observaron desprendimientos en ninguna de las probetas.

En la Tabla 1 se observa una reducción de la VPU en todos los hormigones reforzados con fibras calentados poniendo en evidencia el daño existente. No obstante, los resultados indican un deterioro desigual entre los distintos hormigones. En el caso de la exposición a 500 °C la velocidad en los hormigones con macrofibras poliméricas del grupo A se redujo, con respecto al hormigón control, en aproximadamente un 65% para M3 y 85% para M6; mientras que en los hormigones más resistentes (grupo B) la caída para M6 fue menor, se redujo un 70%. En los hormigones del grupo B con una combinación híbrida de fibras, la VPU se redujo un 60% para m0.6 M3 y un 47% para m0.6 S40. En los hormigones con microfibras (m0.6 y m1) la velocidad residual resultó similar, del orden del 50% para cada hormigón del grupo B, y del 45% aproximadamente para los del grupo A (m1 y m2). Esto indicaría una menor degradación respecto a los hormigones con macrofibras poliméricas. En el caso de la exposición a 700 °C, debido al alto nivel de deterioro, no se pudo medir la VPU en ninguno de los hormigones.

En cuanto al cuadro de fisuración, los resultados de la Tabla 1 indican que a medida que se incrementa la temperatura de exposición crecen la densidad y el ancho de las fisuras. En las probetas con microfibras se generaron fisuras más finas que en las muestras con macrofibras poliméricas. En el hormigón A la densidad de fisuras de las probetas con macrofibras poliméricas (M3 y M6) es entre 5 a 8 veces mayor con respecto a las que contenían microfibras (m1 y m2). En el hormigón más resistente la tendencia es similar, luego de la exposición a 500°C, los hormigones con microfibras (m0.6, m1 y m0.6 S40) prácticamente no presentaron fisuras visibles. No obstante, en los hormigones con macrofibras poliméricas (m0.6 M3 y M6) el cuadro de fisuración resultó más importante y evidente a medida que se incrementó el contenido de macrofibras. Cuando las probetas fueron expuestas a 700°C se evidenció un importante incremento de la densidad de fisuras aún para m0.6 S40, aunque menor que en los hormigones con macrofibras poliméricas. En relación al ancho máximo de fisuras las probetas con microfibras, tanto de los hormigones A como B, presentaron fisuras significativamente más finas que las muestras con macrofibras. La exposición a 700° produce un importante incremento en el ancho máximo de fisuras independientemente del tipo de fibra, el hormigón m0.6 S40 (microfibras más fibras de acero) presentó el menor ancho de fisura.

Si se comparan los hormigones A y B se observa que a 500°, la densidad y ancho de fisuras de las probetas con microfibras (m1) resultan muy similares, mientras que la incorporación de macrofibras (M6) dio lugar a una mayor cantidad de fisuras pero más finas en el hormigón más resistente. La bibliografía [6, 8] indica que las microfibras al ser más pequeñas, se incorporan en mayor número dando lugar a una mayor interconexión de los canales que dejan al evaporarse, resultando más eficientes en el alivio de las presiones de vapor. El uso de fibras poliméricas altera los cambios en la microestructura del hormigón a alta temperatura. En el caso del polipropileno, al fundirse penetra en la pasta de cemento circundante y, además, se ha observado la nucleación de microfisuras iniciada en el canal que deja la fibra fundida [14]. En este trabajo se observó que la incorporación de 0,6 kg/m^3 de microfibras resultó aún más beneficiosa que dosis mayores como las generalmente recomendadas por la bibliografía.

Tabla 1. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistencia a compresión (f'c) y módulo de elasticidad antes y después de la exposición a 500 o 700ºC, densidad y ancho máximo de fisura después de la exposición a 500 o 700ºC.

Identificación			VPU		Análisis de fisuración		f'c		E	
			m/s	%	Densidad cm/cm^2	Ancho máximo mm	MPa	%	GPa	%
Hormigón A	**HS**	control	4300	100	-	-	29,3	100	32,5	100
	m1	control	4300	100	-	-	28,9	100	34,9	100
		500°	2000	47	0,007	0,050	15,8	55	8,9	26
		700°	-	-	0,091	0,250	3,8	13	0,9	3
	m2	control	4200	100	-	-	29,0	100	30,9	100
		500°	1900	45	0,010	0,095	15,9	55	10,7	35
		700°	-	-	0,061	0,325	3,4	12	1,3	4
	M3	control	4200	100	-	-	28,0	100	32,4	100
		500°	1500	35	0,047	0,090	16,2	58	8,5	26
		700°	-	-	0,124	0,410	3,0	12	0,9	3
	M6	control	4100	100	-	-	28,3	100	34,4	100
		500°	500	13	0,06	0,190	15,3	54	8,0	27
		700°	-	-	0,204	0,535	3,4	13	1,2	4
Hormigón B	**HS**	control	4802	100	-	-	74,6	100	40,1	100
	m0,6	control	4717	100	-	-	77,4	100	39,1	100
		500°	2465	52	0,009	0,030	50,9	66	15,8	40
	m1	control	4698	100	-	-	78,1	100	39,3	100
		500°	2351	50	0,006	0,050	44,1	56	11,8	30
	m0,6 M3	control	4692	100	-	-	77,6	100	39,2	100
		500°	1886	40	0,057	0,070	38,9	50	12,6	32
		700°	-	-	0,255	0,230	10,4	13	2,8	7
	M6	control	4721	100	-	-	73,6	100	40,1	100
		500°	1405	30	0,101	0,090	38,2	52	11,7	29
		700°	-	-	0,297	0,270	8,5	12	1,4	4
	m0,6 S40	control	4726	100	-	-	77,5	100	40,7	100
		500°	2491	53	0,007	0,030	52,3	67	15,1	37
		700°	-	-	0,141	0,100	26,5	34	4,4	11

En la Figura 1 se puede observar con más detalle el aspecto superficial de hormigones con micro y macro fibras expuestos a 700 ºC del grupo A, se aprecia que las macrofibras al fundirse o al evaporarse dañan la matriz que las rodea y se forman fisuras a partir de los canales que dejan.

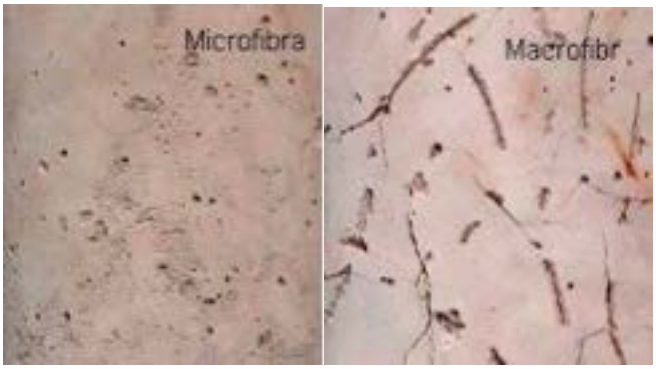


Figura 1: Aspecto superficial de probetas con micro y macrofibras expuestas a 700°C,

Propiedades mecánicas residuales

La exposición a altas temperaturas produjo una significativa caída de resistencia en todos los hormigones, cabe recordar que las probetas se encontraban saturadas al momento de ser expuestas a temperatura, lo que condujo a un mayor daño. Al comparar la caída en la resistencia, en el grupo A no se observan diferencias significativas en los hormigones reforzados con microfibras o con macrofibras poliméricas, para ambos niveles de calentamiento, Por el contrario, en los hormigones del grupo más resistente durante la exposición a 500°C la resistencia de los hormigones con macrofibras sintéticas fue la más afectada, el menos afectado fue el hormigón con microfibra y fibra de acero seguido por el hormigón con la menor dosis de microfibra. Estas diferencias se hicieron más evidentes en las series expuestas a 700°C donde la resistencia decae a aproximadamente 12% para m0,6 M3 y M6, mientras que para m0,6 S40 cae a 34%.

Es sabido que el módulo de elasticidad del hormigón es un parámetro más sensible al daño por altas temperaturas que la resistencia a compresión. En las series expuestas a 500°C el módulo de elasticidad se reduce a aproximadamente 25% para los hormigones del grupo A elaborados con macrofibras sintéticas (M3 y M6) y con 1kg/m^3 de microfibras, 30% para los hormigones del grupo B elaborados con macrofibras (m0,6 M3 y M6) y del grupo A con 2 kg/m^3 de microfibras y a 40% en el resto (m0,6, m1 y m0,6 S40), en concordancia con la mayor fisuración observada en los hormigones con macrofibras poliméricas. Después de la exposición a 700°C el daño es muy evidente y la rigidez se reduce drásticamente, especialmente en los hormigones menos resistentes, dado que ninguno de los hormigones conservó más del 10% de la rigidez de la muestra control.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio para analizar la contribución de diferentes tipos y dosis de fibras poliméricas y fibras de acero frente al daño que sufre el hormigón por la exposición a alta temperatura.

Se verifica que el daño producido por la exposición a alta temperatura de hormigones con elevados contenidos de humedad es significativo, tanto mayor cuanto mayor es la temperatura de exposición.

Los hormigones sin fibras exhibieron desprendimientos explosivos, presentando un muy importante nivel de daño, haciendo imposible su caracterización. La incorporación de fibras al hormigón redujo el daño por temperatura y en ningún caso se produjo desprendimiento explosivo. No obstante ello, los hormigones reforzados con fibras presentaron diversos grados de fisuración variable en función del tipo y contenido de fibra. Los hormigones con macrofibras poliméricas presentaron el mayor nivel de daño, con mayor densidad y ancho de fisuras como

así también menores resistencias y rigideces residuales. Las microfibras fueron las más eficientes en el control del daño por temperatura; incluso la incorporación de 0,6 kg/m^3 de microfibras resultó aún más beneficiosa que dosis mayores recomendadas por la bibliografía.

REFERENCIAS

[1] Khoury G, “Passive fire protection of concrete structures”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings, 161, Issue SB3, (2008), 135–145
[2] Kalifa P, “High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure”, Cement and Concrete Research, 31, (2001), 1487–1499,
[3] Klingsch E “Explosive spalling of concrete in fire”, Doctoral Thesis ETH Zürich, Research Collection, (2014),
[4] Varona FB, Baeza FJ, Bru D, Ivorra S, “Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure”, Construction and Building Materials, 176, (2018), 359–370,
[5] EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules-Structural fire design, Brussels Comite Europeen de Normalisation (CEN), (2004),
[6] Heo YS, Sanjayan JG, Han CG and Han MC, “Critical parameters of nylon and other fibres for spalling protection of high strength concrete in fire”, Materials & Structures, 44, (2011), 599–610,
[7] Schneider U and Horvath J, “Behaviour of ordinary concrete at high temperature“, Heft 9, Technical University of Vienna, Austria, (2003),
[8] Khoury G and Willoughby B, “Polypropylene fibres in heated concrete, Part 1: Molecular structure and materials behaviour”, Magazine of Concrete Research, 60, No, 2, (2008), 125–136,
[9] Li Y, Tan K H, Yang E H, “Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature”, Cement and Concrete Composites, (2018),
[10] Khaliq W and Kodur V, “Effectiveness of polypropylene and steel fibers in enhancing fire resistance of high-strength concrete columns”, J, Struct, Eng,, ASCE, 144 (3), (2018),
[11] Shuttleworth P, “Fire protection of concrete tunnel linings”, Tunnel Management International, Vol 3, (2002),
[12] Phan L T, “High-Strength concrete at high temperature – An overview”, Cement and Concrete Research, 41, (2011), 1150-1156,
[13] Zhang, P,, Kang, L,, Wang, J, Guo, J,, Hu, S,, Ling, Y, “Mechanical properties and spalling behavior of steel fiber reinforced concrete exposed to high temperature – A review”, Applied Science, 10, (2020), 1-14,
[14] Pimienta P, McNamee R J and Mingeguia J-C, “Physical properties and behaviour of high-performance concrete at high temperature”, State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 227-HPB vol 29, (2019), p,152,

MODELACIÓN DE RESPUESTA SISMICA DE PRESAS DE HORMIGON EN REGIMEN NO LINEAL EN ABAQUS

Kevin Vivas Escobar, J. Francisco Bissio, E. Ignacio Villa, Claudio Rocco

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.

* E-mail: kevin.vivas@alu.ing.unlp.edu.ar

Introduccion

Las presas de hormigón tradicional y compactado cumplen funciones esenciales como la generación de energía, el riego y el control de inundaciones, destacándose por su rigidez estructural y durabilidad. El análisis tensional bajo las acciones usuales (peso propio, empuje hidrostático y acciones sísmicas) se ha realizado históricamente utilizando modelos lineales de respuesta del material. Sin embargo, cuando se encuentran localizadas en zonas de alto riesgo sísmico, resultan sometidas a elevados estados tensionales, lo que puede provocar daños locales o incluso fisuras significativas que atraviesen la sección y comprometan la integridad de la presa y su estabilidad post sismo. La modelación numérica permite analizar la respuesta sísmica en régimen no lineal bajo solicitaciones dinámicas, incorporando la degradación del material, la presencia de fisuras y el comportamiento post-pico, aspectos que no pueden ser correctamente captados por los modelos lineales utilizados tradicionalmente.

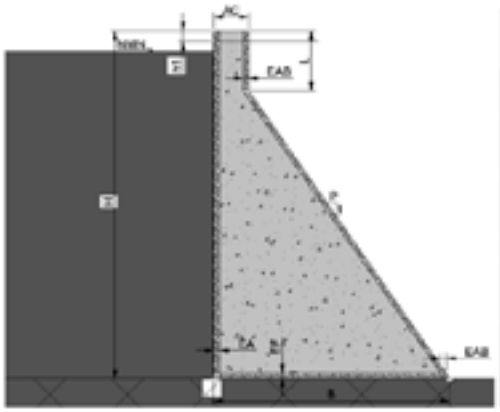
El presente trabajo tiene como objetivo evaluar, mediante modelación numérica en el software de elementos finitos Abaqus, el comportamiento de presas de hormigón sometidas a sismos de distintas magnitudes, con el fin de analizar su desempeño tanto en el rango lineal como no lineal. Además, se propone una forma de cuantificar el daño global de la presa mediante un parámetro denominado “Valor de Daño Global (VDG)”, el cual está basado en el modelo constitutivo presente en Abaqus denominado Concrete Damage Plasticity (CDP).

Modelo Numérico

Para el análisis, se seleccionaron cuatro alturas de presa (50 m, 75 m, 100 m, 125 m), y cuatro pendientes del paramento aguas abajo. El ancho de coronamiento (AC) tiene un valor fijo de 10 m. La presa cuenta con dos tipos de hormigón: para la parte interior, hormigón H-15, y para la exterior, hormigón H-20. El espesor del material en la parte exterior se indica con los valores de espesor aguas arriba (EA), espesor aguas abajo (EAB) y espesor en la fundación (EF), como se muestra en la Figura 1.

El nivel de agua se considera en el Nivel Máximo Normal (NMN). Para la geometría de la fundación, se consideró un ancho hacia aguas arriba y aguas abajo equivalente a dos veces la altura de la presa, y una profundidad igual a la altura de la presa.

Como se mencionó, la presa cuenta con dos calidades de hormigón, H-15 y H-20, con valores de módulo de elasticidad inicial de 28.4 GPa y 30.03 Gpa respectivamente, ν = 0,20. El macizo de fundación se modela con E=50 GPa y ν = 0,25.



	CASO	H	P	B	NME b1	NMN b2	EAA	EAB	EF	FUNDACION ROCA Ancho	FUNDACION ROCA Espesor
		(m)		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	kN	(E)
1	50-060-15-20	50	0.60	20.95	1.75	1.25	1.25	1.00	1.00	220.95	50.00
2	50-065-15-20	50	0.65	31.36	1.75	1.25	1.25	1.00	1.00	231.36	50.00
3	50-070-15-20	50	0.70	33.78	1.75	1.25	1.25	1.00	1.00	233.78	50.00
4	50-075-15-20	50	0.75	36.19	1.75	1.25	1.25	1.00	1.00	236.19	50.00
5	75-065-15-20	75	0.65	47.45	2.0	2.0	1.50	1.00	1.25	347.45	50.00
6	75-070-15-20	75	0.70	51.10	2.0	2.0	1.50	1.00	1.25	351.10	75.00
7	75-075-15-20	75	0.75	54.75	2.0	2.0	1.50	1.00	1.25	354.75	75.00
8	75-080-15-20	75	0.80	58.40	2.0	2.0	1.50	1.00	1.25	358.40	75.00
9	100-070-15-20	100	0.70	67.90	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	467.90	75.00
10	100-075-15-20	100	0.75	72.75	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	472.75	100.00
11	100-080-15-20	100	0.80	77.60	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	477.60	100.00
12	100-085-15-20	100	0.85	82.45	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	482.45	100.00
13	125-070-15-20	125	0.70	85.40	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	585.40	100.00
14	125-075-15-20	125	0.75	91.50	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	591.50	125.00
15	125-080-15-20	125	0.80	97.60	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	597.60	125.00
16	125-085-15-20	125	0.85	103.70	3.0	3.0	1.75	1.50	1.50	603.70	125.00

Figura 1 - Geometria de las presas analizadas

Para considerar la no linealidad de los materiales de la presa, se empleó el modelo constitutivo incluido en Abaqus, denominado Concrete Damage Plasticity (CDP). Este modelo integra plasticidad multi-endurecida no asociada y elasticidad dañada isotrópica para describir el daño irreversible que ocurre durante la fractura. Para el comportamiento en tracción, se emplean curvas de tensión-desplazamiento basadas en el criterio de fractura de Hillerborg (1976), lo que permite reducir la sensibilidad excesiva de la malla. En la Figura 2 y la Tabla 1 se observan las curvas y los valores ingresados en el modelo.

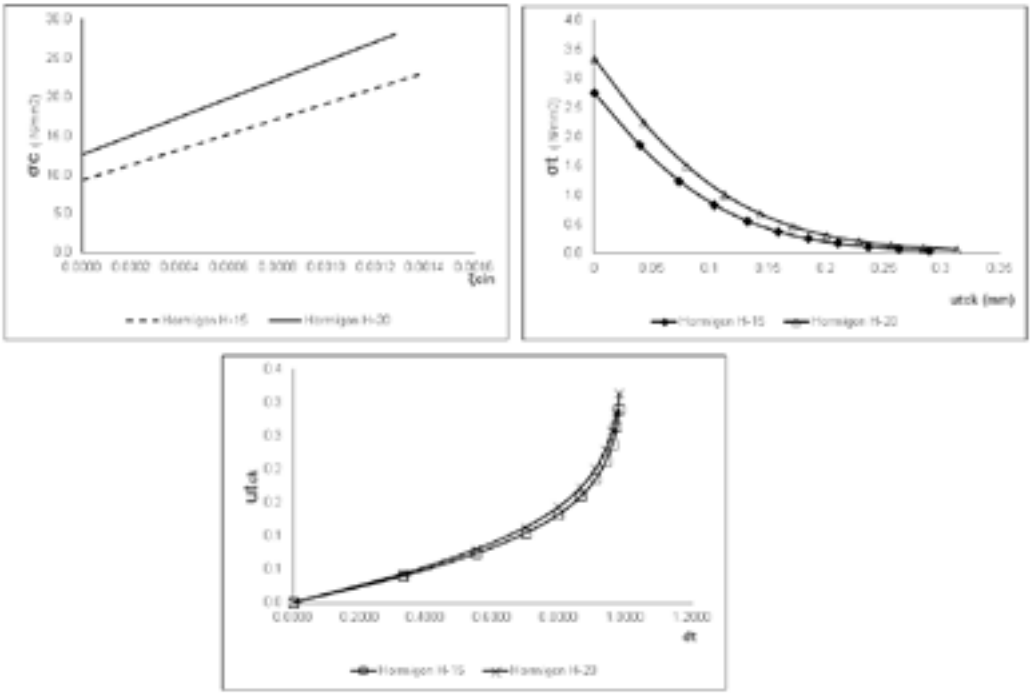


Figura 2 - Curvas Modelos CDP. (1) Tension de compresion-deformacion. (2) Tensión de traccion-desplazamiento. (3) Deformacion-parametro de daño.

Las cargas consideradas en el modelo son el peso propio, determinado mediante el peso específico del hormigón, sin considerar el peso específico de la fundación, ya que esto mejora la convergencia del modelo numérico. También se consideran la carga hidrostática del embalse y la sobrepresión hidrodinámica del mismo, utilizando la teoría de masa añadida de Westergaard. Los sismos aplicados se pueden observar en la Tabla 2. Estos consisten en cinco sismos de mediana a gran intensidad, los cuales fueron aplicados mediante acelerogramas de sus componentes, como se muestra en la Figura 3.

Tabla 1 - Datos ingresados para el modelo CDP

Hormigón H-15 y H-20				
DILATION ANGLE	**ECCENTRICITY**	**fbo/fco**	**K**	**Viscosity Parameter**
20	1	1.2	0.66	0

Tabla 2 - Datos de sismos aplicados

		PGA		Intensidad de Arias(m/seg)		Duracion significativa (seg)	
	MW Aprox	**Componente Horizontal**	**Componente vertical**	**Componente Horizontal**	**Componente vertical**	**Componente Horizontal**	**Componente vertical**
S1	4	0.36	0.18	0.82	0.23	6.35	7.05
S2	7	0.88	0.75	3.20	2.03	3.85	4.61
S3	7	1.02	0.85	10.32	5.26	9.47	7.11
S4	7	1.02	0.86	22.82	7.09	9.39	9.39
S5	7.2	1.02	0.86	22.82	7.00	18.01	11.07

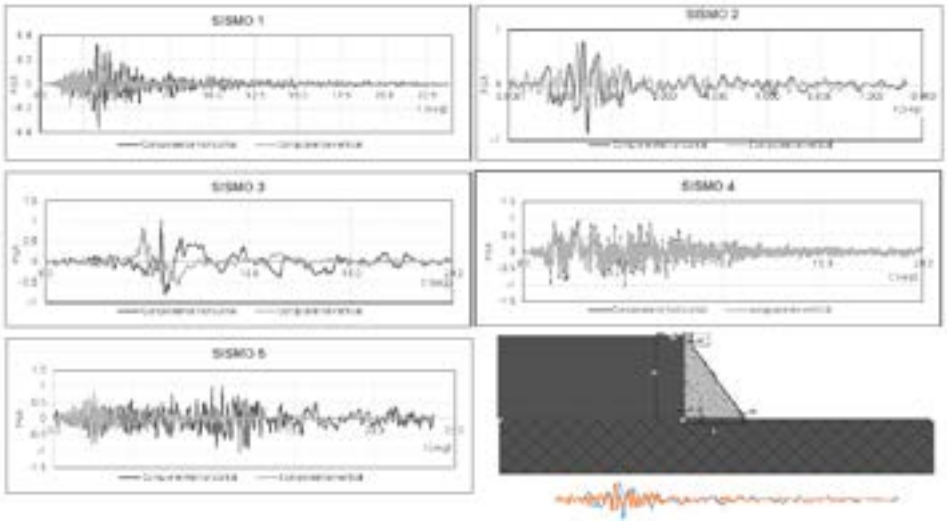


Figura 3 - Acelerogramas de sismos

Se introdujo un amortiguamiento de tipo Rayleigh ajustando los factores α y β para un valor de ξ=10 % en función de los dos períodos propios más significativos en términos de participación de masa del sistema. Es importante considerar que el comportamiento plástico del material introduce otra vía para disipar energía. Se realizó un análisis paso a paso utilizando el modelo Dynamic Explicit en Abaqus. Se consideraron 16 geometrías y 5 sismos, generando 80 modelos con no linealidad de materiales y 80 con linealidad, con el fin de comparar la influencia del tipo de análisis. Además, se evaluó la influencia de la componente vertical de los acelerogramas, lo que resultó en un total de 406 modelos.

En cuanto a la distribución de daño según Concrete Damage Plasticity, es una variable cualitativa que Abaqus representa mediante una escala de colores, como se observa en la Figura 5. A cada elemento se le asigna un valor de daño dt en un rango de 0 a 1, donde 0 indica ausencia de daño y 1 representa daño total.

Se propone una forma de cuantificar el daño de toda la presa mediante un parámetro denominado Valor de Daño Global (VDG), el cual también podría servir como indicador de la viabilidad del diseño de la presa. Este parámetro se calcula como la suma ponderada del daño de cada elemento, utilizando el parámetro de daño *dt* asociado a cada elemento y su respectiva área, dividida por el área total de la presa. La fórmula general se expresa:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d_t \cdot A_i}{A_{total}} \qquad (1)$$

donde *Ai* es el área de cada elemento y *Atotal* es el área total de la presa y *dt* es el valor que asigna Abaqus cada elemento, como se mencionó anteriormente.

Resultados y discusión

Para validar los modelos, se realiza una comparación de los valores de desplazamiento horizontal relativo en la cresta (U1) y aceleración horizontal, entre los modelos lineales y no lineales. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para una presa de altura 125 m y pendiente 0,80, aplicando los acelerogramas de los sismos 1 y 5 mostrados previamente. Como era de esperarse, en los modelos no lineales se observa la aparición de un desplazamiento residual, producto del daño acumulativo sufrido en la presa debido principalmente a las acciones sísmicas.

Figura 4 - Desplazamientos y aceleracion presa 125080 para Sismo 1 y Sismo 4

El patron de daño que se obtiene con programa se puede relacionar con el valor de daño global porpuesto (VDG). En la figura 5 donde se observa su relación modo con el patron de fisuración. El VDG evoluciona durante el sismo y está influenciado por la geometría de la presa y las características del sismo. En la Figura 5 se muestra cómo varía el valor del daño en función del patrón de daño al final del sismo. A simple vista, se observa que valores menores a 0,05 indicarían daños limitados en el cuerpo de la presa, mientras que valores cecanos a 0,2 y superiores pueden indicar daño extensivo e inestabilidad global Post Sismo.

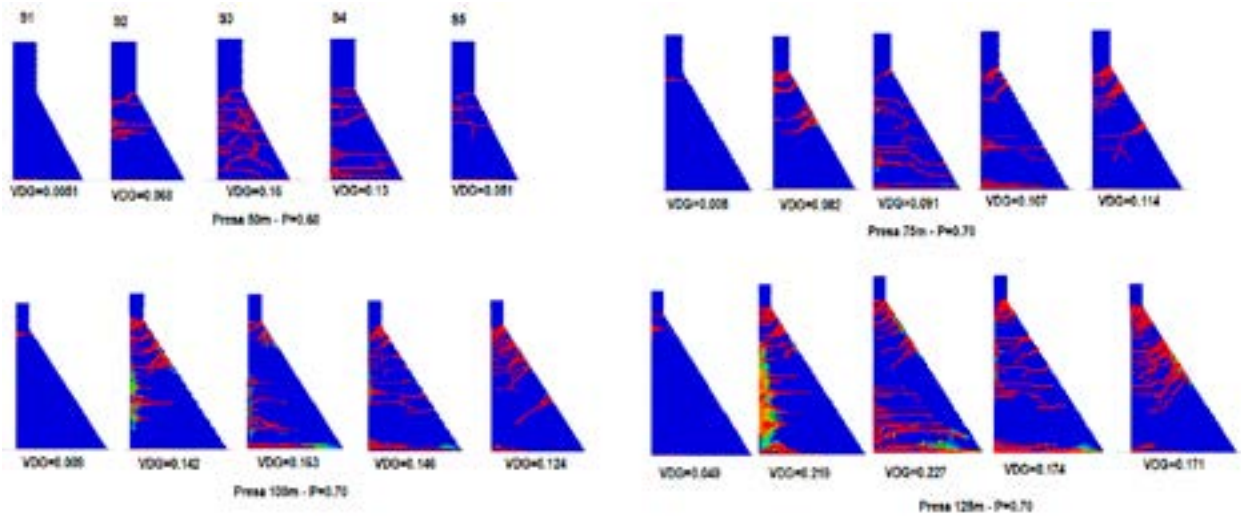


Figura 5 -VDG-patron de daño al final de los sismos para presas de altura 50 m, 75 m, 100 m, 125 m.

Como se mencionó anteriormente, el patrón de daño descrito está relacionado con el final del sismo. En la Figura 6 se muestra el desarrollo del patrón de daño y el valor de daño (VDG), evidenciando cómo este valor cambia a medida que avanza el sismo. En este caso, se presenta el desarrollo para la presa 100070 (Altura=100, pendiente=0.70) bajo los sismos 5 y 1, observándose cómo el valor de daño varía considerablemente en los puntos de mayor aceleración.

Para evaluar la asimetría del sismo y los efectos multidireccionales, se consideraron cinco casos de análisis diferentes. Los primeros cuatro consideraron el cambio de signo del acelerograma, mientras que el quinto evaluó la influencia de no considerar la componente vertical, comparando los resultados con el VDG. En la Figura 7 se muestra el análisis para la presa 100070, aplicando el sismo 5, que presenta una asimetría considerable en su componente vertical. En los casos 3 y 4, cuando se produce un cambio de signo en dicha componente, los desplazamientos aumentan exponencialmente. Aunque los casos 1 y 2 indican un comportamiento óptimo, los casos 3 y 4 sugieren una desestabilización de la presa, lo que podría requerir mejorar el diseño o realizar análisis adicionales. Estos casos de desestabilización ocurren cuando el VDG al final del sismo supera 0,25, lo que señala un indicador clave: si los valores de VDG se acercan a este umbral en un modelo de presa, es posible anticipar el patrón de daño y los desplazamientos remanentes. Además, estos resultados se pueden correlacionar con metodologías lineales, como el Demand Capacity Ratio propuesto por la USACE, lo que permite estimar los parámetros mencionados sin necesidad de recurrir a modelos no lineales.

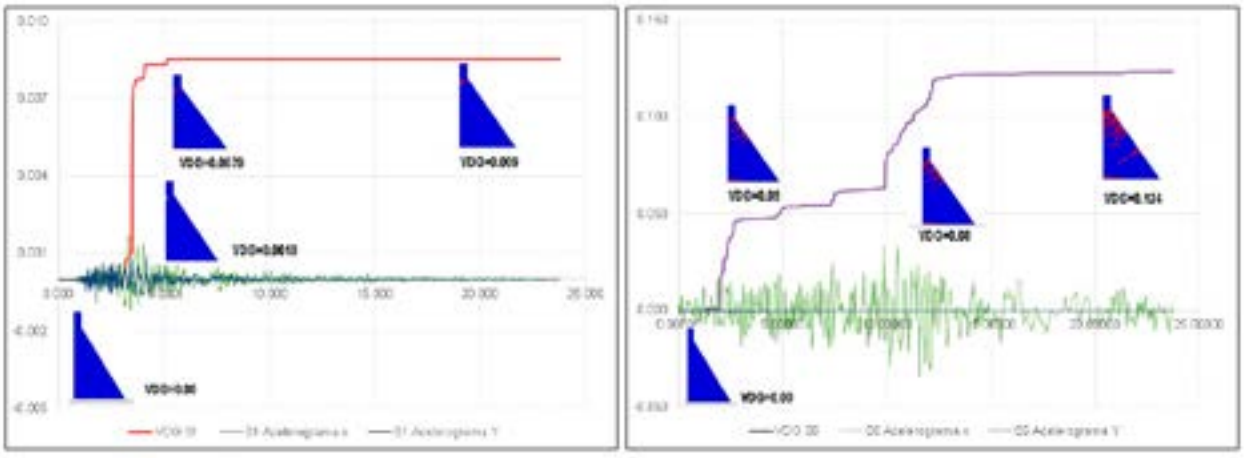


Figura 6 - Curva VDG para los S1 Y S5 para la presa 100070

	Altura de presa + pendiente	SISMO 1 - t=23,75				SISMO 2 - t=7,68				SISMO 3 - t=20,02				SISMO 4 - t=29,99				SISMO 5 - t=23,69				
		Valor de daño global (VDG)				Valor de daño global (VDG)				Valor de daño global (VDG)				Valor de daño global (VDG)				Valor de daño global (VDG)				
		Caso 1 (+H, +V)	Caso 2 (-H, +V)	Caso 3 (-H, -V)	Caso 4 (-H, -V)	Caso 1 (+H, +V)	Caso 2 (-H, +V)	Caso 3 (-H, -V)	Caso 4 (-H, -V)	Caso 1 (+H, +V)	Caso 2 (-H, +V)	Caso 3 (-H, -V)	Caso 4 (-H, -V)	Caso 1 (+H, +V)	Caso 2 (-H, +V)	Caso 3 (-H, -V)	Caso 4 (-H, -V)	Caso 1 (+H, +V)	Caso 2 (-H, +V)	Caso 3 (-H, -V)	Caso 4 (-H, -V)	*Caso 5 (+H)*
50 m	**50060**	0,0510	0,010	0,011	0,008	0,068	0,135	0,103	0,125	0,160	0,210	0,110	0,126	0,133	0,060	0,044	0,156	0,051	0,110	0,550	0,390	**0,050**
	50065	0,0014	0,001	0,002	0,000	0,049	0,039	0,051	0,054	0,154	0,240	0,181	0,129	0,104	0,030	0,063	0,113	0,077	0,066	0,490	0,248	**0,049**
	50070	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,043	0,038	0,049	0,151	0,280	0,120	0,120	0,117	0,030	0,064	0,135	0,043	0,053	0,530	0,344	
	50075	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,035	0,024	0,043	0,101	0,270	0,121	0,101	0,110	0,030	0,042	0,146	0,032	0,016	0,510	0,176	
75 m	**75065**	0,0090	0,007	0,011	0,009	0,085	0,107	0,089	0,096	0,137	0,220	0,177	0,123	0,107	0,030	0,064	0,124	0,094	0,116	0,610	0,428	
	75070	0,0079	0,007	0,007	0,009	0,082	0,093	0,087	0,082	0,091	0,200	0,136	0,116	0,107	0,020	0,067	0,137	0,114	0,115	0,670	0,428	
	75075	0,0094	0,008	0,008	0,010	0,033	0,044	0,047	0,038	0,062	0,450	0,101	0,127	0,087	0,050	0,056	0,139	0,082	0,109	0,340	0,260	
	75080	0,0024	0,003	0,002	0,006	0,067	0,070	0,070	0,066	0,020	0,150	0,032	0,071	0,078	0,020	0,024	0,119	0,120	0,099	0,600	0,491	
100 m	**100070**	0,0086	0,010	0,011	0,008	0,142	0,135	0,103	0,125	0,163	0,210	0,211	0,126	0,146	0,060	0,044	0,156	0,124	0,110	0,550	0,398	**0,0996**
	100075	0,0079	0,008	0,009	0,007	0,138	0,129	0,110	0,111	0,119	0,190	0,180	0,117	0,138	0,050	0,030	0,161	0,126	0,122	0,580	0,319	
	100080	0,0047	0,007	0,006	0,007	0,131	0,124	0,114	0,106	0,082	0,160	0,140	0,106	0,125	0,030	0,016	0,146	0,107	0,124	0,400	0,274	
	100085	0,0050	0,007	0,006	0,006	0,115	0,123	0,103	0,098	0,050	0,150	0,125	0,102	0,114	0,020	0,014	0,135	0,123	0,114	0,360	0,270	**0,122**
125 m	**125070**	0,0492	0,013	0,015	0,010	0,219	0,219	0,133	0,126	0,227	0,247	0,245	0,210	0,174	0,095	0,075	0,213	0,171	0,176	0,648	0,499	**0,129**
	125075	0,0110	0,012	0,013	0,006	0,201	0,217	0,124	0,107	0,171	0,340	0,259	0,195	0,176	0,080	0,065	0,187	0,176	0,132	0,480	0,407	
	125080	0,0079	0,010	0,011	0,008	0,143	0,135	0,103	0,125	0,163	0,210	0,211	0,126	0,161	0,060	0,440	0,156	0,157	0,110	0,550	0,398	
	125085	0,0055	0,012	0,012	0,007	0,196	0,219	0,124	0,108	0,137	0,258	0,402	0,161	0,157	0,066	0,057	0,180	0,163	0,134	0,528	0,324	**0,130**

Figura 8- Tabla resumen del valor de daño global para los modelos lineales analizados

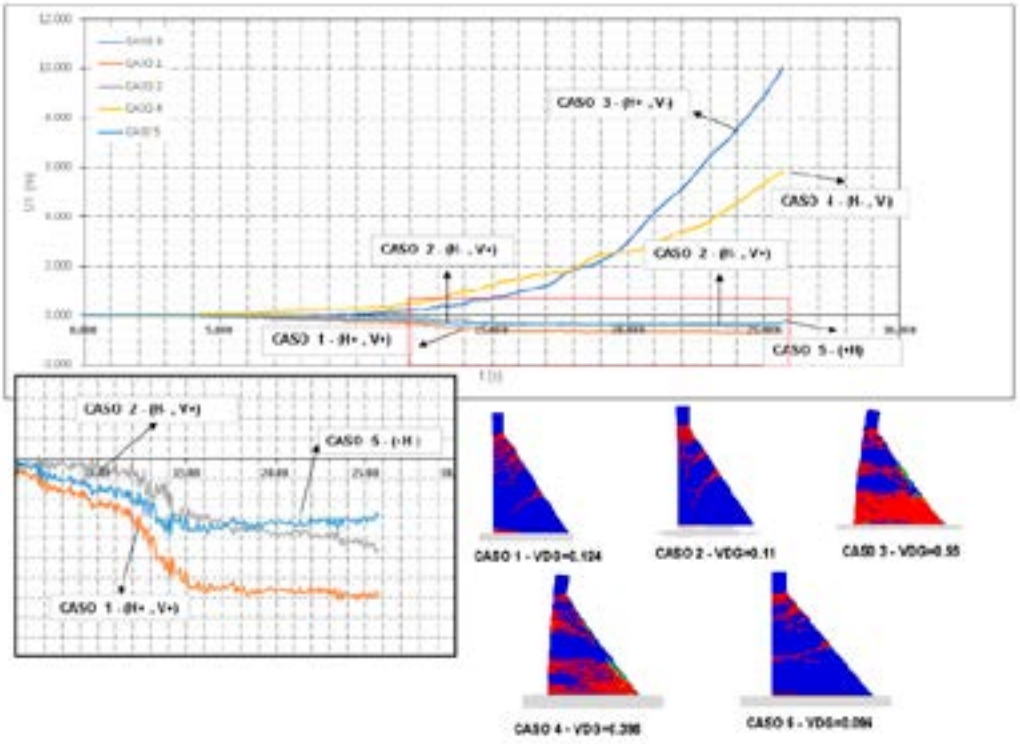


Figura 9 - Graficas desplazamiento para la presa 100070 aplicando S5; Caso 1,2,3,4,5

Conclusiones

Se ha realizado un análisis numérico extensivo de presas de hormigón simple sometidas a acciones sísmicas de mediana a muy alta intensidad, considerando diversas geometrías que incluyen alturas medianas a muy altas, y un amplio rango de pendientes del paramento agua abajo. Para el análisis se empleó el software Abaqus, considerando la no linealidad de los materiales de la presa mediante el modelo constitutivo denominado Concrete Damage Plasticity (CDP), el cual incluye la posibilidad de evaluar el daño localmente a través del parámetro de daño dt que toma valores entre 0 a 1. Finalmente, se propone un parámetro global denominado VDG que permita evaluar el daño remanente al final del sismo, pudiéndose correlacionar el mismo con patrones de comportamiento satisfactorio, así como casos en que es posible identificar una inestabilidad post sismo de la presa.

Bibliografía

[1] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume III: Materials. Dassault Systèms Simulia Corp., (2013).
[2] USACE. Earthquake Design and evaluation of concrete hydraulic structures (2007)
[3] A. Chopra. Simplified Analysis for Earthquake resistant design of concrete gravity dams (1986).
[4] K. Vivas, JF Bissio, E.I. Villa, C. Rocco. Modelación de respuesta sísmica de presas de hormigón en régimen no lineal en ABAQUS (2025).
[5] JF Bissio. El Diseño de presas en zonas de alta sismicidad. (2013)
[6] M. Braun, M.P Zappitelli, C. Rocco, E.I. Villa. Aplicación de un modelo elástico y lineal al estudio de estabilidad de fisuras en presas de hormigón (2019).

ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE METODOLOGÍAS EN EL DESEMPEÑO SÍSMICO DE PRESAS DE HORMIGÓN CON MODELACIÓN NUMÉRICA EN ABAQUS

Kevin Vivas Escobar, J. Francisco Bissio, E. Ignacio Villa, Claudio Rocco

[a] Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.

* E-mail: kevin.vivas@alu.ing.unlp.edu.ar

Resumen

La modelación numérica de presas en régimen no lineal ofrece una evaluación más precisa de su comportamiento, incluso en condiciones extremas, al considerar la degradación del material, la presencia de fisuras y el comportamiento post-pico, aspectos que los modelos lineales no pueden captar adecuadamente aunque los siguen siendo ampliamente utilizados en el diseño de presas debido a su simplicidad y eficiencia computacional. Sin embargo, su capacidad para predecir los efectos de sismos de gran magnitud es limitada lo que ha motivado la necesidad de reconsiderar su uso en escenarios con alta demanda sísmica.

Este trabajo es la continuación de otro (Referencia (4)), en el cual los autores realizan un análisis del desempeño sísmico de presas de hormigón, considerando perfiles de distintas alturas (50 m, 75 m, 100 m y 125 m) sometidas a cinco sismos con magnitudes entre 4 y 7.5.

El análisis lineal emplea la metodología DCR (Demand Capacity Ratio) del US Army Corps of Engineers (USACE). Basado en esta metodología, se propone un nuevo enfoque denominado DCR equivalente para evaluar el comportamiento global de la presa. En el análisis no lineal, se utiliza el parámetro VDG (Valor de Daño Global), presentado en el trabajo previamente citado, para cuantificar la evolución del daño mediante el modelo Concrete Damage Plasticity (CDP) en ABAQUS. Los resultados obtenidos utilizando ambas metodologías se comparan para correlacionar los resultados y estimar el daño potencial de la presa a través de un análisis lineal, definiendo valores límite indicativos de inestabilidad global.

Modelo Numérico

Se analizaron 16 presas de hormigón, con cuatro alturas y cuatro pendientes en el paramento aguas abajo diferentes, manteniendo en todos los casos un ancho de coronamiento fijo de 10 m como se muestra en la Figura 1. Se consideraron dos tipos de hormigón diferentes (H-15para la parte interior y H-20 para la exterior) con módulos de elasticidad de 28.4 GPa y 30.03 GPa, respectivamente. El comportamiento de la roca de fundación se consideró elástico lineal, con un módulo de elasticidad de 50 GPa. Para considerar la no linealidad del hormigón, se empleó el modelo Concrete Damage Plasticity (CDP) en ABAQUS, que describe el daño irreversible durante la fractura utilizando curvas de tensión-desplazamiento basadas en el criterio de fractura de Hillerborg. Se aplicaron cargas como el peso propio de la presa, la carga hidrostática y la sobrepresión hidrodinámica, calculadas mediante la teoría de masa añadida de Westergaard.

El modelo fue sometido a cinco sismos de mediana a gran intensidad, cuyas componentes fueron aplicadas mediante acelerogramas, tal como se muestra en la Figura 2. Además, se incorporó un amortiguamiento de tipo Rayleigh, con un valor de ξ=10 %, ajustado a los dos períodos propios más significativos del sistema.

El análisis, realizado con el modelo Dynamic Explicit en Abaqus, consideró 16 geometrías y 5 sismos, generando un total de 406 modelos al variar las componentes sísmicas. De estos, 320 incorporaron no linealidad de materiales y 80 fueron lineales, con el objetivo de comparar ambos enfoques en el comportamiento de la presa.

Además, se introdujo el parámetro Valor de Daño Global (VDG), que cuantifica el daño total de la presa y puede servir como indicador de la viabilidad del diseño. Este parámetro se calcula como la suma ponderada del daño de cada elemento, usando el parámetro de daño (dt) de cada elemento y su área, dividido por el área total de la presa. La fórmula general se expresa:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d_t \cdot A_i}{A_{total}} \qquad (1)$$

donde *Ai* es el área de cada elemento y *Atotal* es el área total de la presa y *dt* es el valor que asigna Abaqus cada elemento, como se mencionó anteriormente.

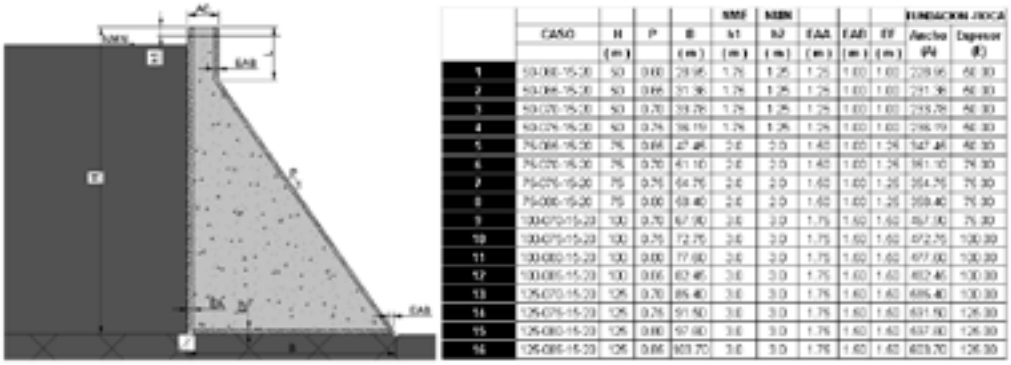


Figura 1 - Geometría de las presas analizadas

Tabla 1 - Datos de sismos aplicados

		PGA		Intensidad de Arias(m/seg)		Duracion significativa (seg)	
	MW Aprox	Componente Horizontal	Componente vertical	Componente Horizontal	Componente vertical	Componente Horizontal	Componente vertical
S1	4	0.36	0.18	0.82	0.23	6.35	7.05
S2	7	0.88	0.75	3.20	2.03	3.85	4.61
S3	7	1.02	0.85	10.32	5.26	9.47	7.11
S4	7	1.02	0.86	22.82	7.09	9.39	9.39
S5	7.2	1.02	0.86	22.82	7.00	18.01	11.07

El DCR es una metodología lineal la cual se define como la relación entre las demandas de esfuerzo y la resistencia estática a la tracción del hormigón de la presa en términos de tensiones, evaluado en distintos puntos de la estructura. Cuando el DCR es inferior a 1.0, se considera que la presa se mantiene dentro del rango lineal-elástico, con poco o ningún daño. Sin embargo, si el DCR está entre 1.0 y 2.0, se espera una respuesta lineal, por lo que las metodologías basadas en el análisis lineal son aplicables. Si el DCR supera el valor de 2.0, se anticipa una respuesta no lineal, que se manifestará en la formación de grietas y deformaciones excesivas y remanentes. El US Army Corps of Engineers (USACE) recomienda el uso de gráficos que muestren la variación del DCR en función de la duración inelástica acumulada, como se presenta en la Figura 3.

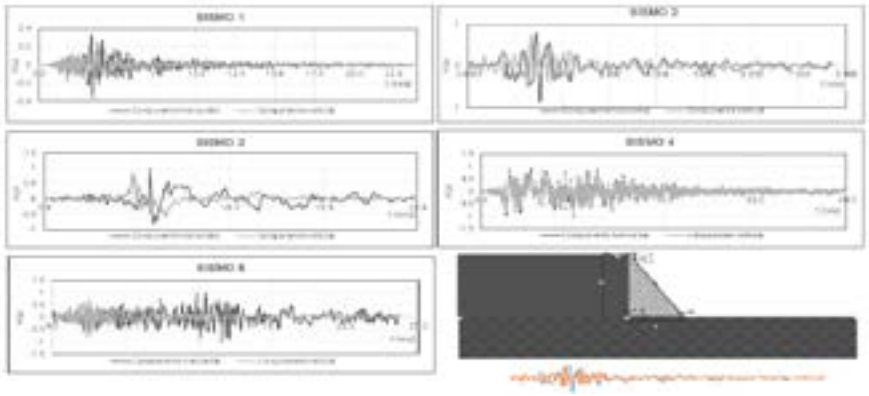


Figura 2 - Acelerogramas de sismos

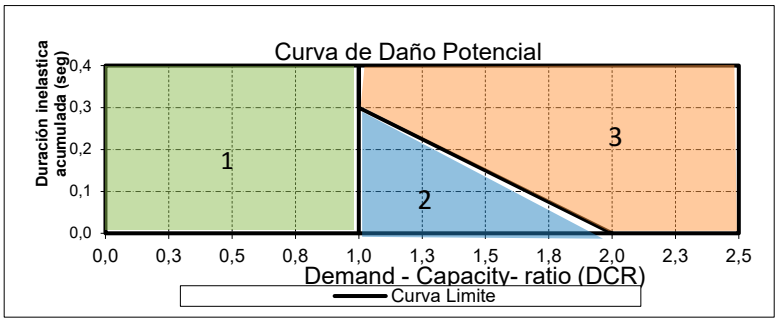


Figura 3 - Curvas de daño potencial según USACE

En una función de la posición de la curva se puede sacar las siguientes conclusiones:

1) Si la curva está en la zona verde, no se espera daño, ya que las tensiones están por debajo de la resistencia a tracción del material.
2) Si está en la zona azul, no se espera daño significativo según el análisis lineal, aunque las tensiones superan la resistencia estática a la tracción, permaneciendo por debajo del doble de este valor.
3) Si la curva está en la zona naranja, aunque sea parcialmente, se recomienda realizar un análisis no lineal para evaluar adecuadamente el desempeño de la presa.

En la Figura 4 se muestran las curvas obtenidas de varios puntos de la presa aplicando el concepto de DCR. En ella, se puede observar que algunas curvas indican la necesidad de un análisis lineal, mientras que otras requieren un análisis no lineal. Además, en la figura también se presenta el patrón de daño obtenido mediante el análisis no lineal, utilizando el modelo constitutivo correspondiente.

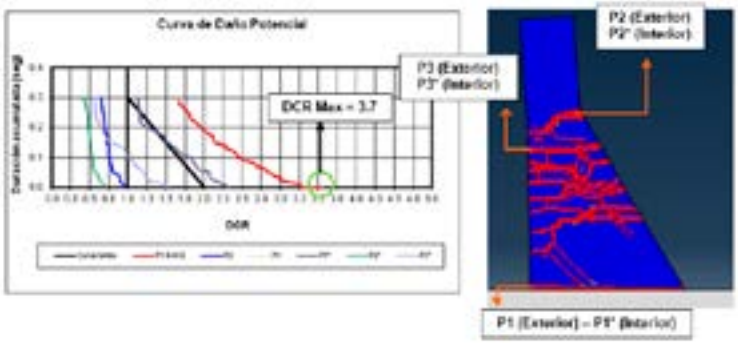


Figura 4 - Valor DCR de puntos característicos presa

La curva de DCR se aplica en varios puntos de la presa para evaluar el daño potencial, como se muestra en la figura anterior. Sin embargo, surge la interrogante de si la información obtenida de uno, dos o tres puntos es representativa del daño global de la presa.

Para abordar esto, se propone un coeficiente denominado **DCR equivalente**, que permite cuantificar la contribución de cada punto analizado, siguiendo la definición de DCR y la gráfica del USACE. Este coeficiente se obtiene integrando las áreas de las curvas en la zona no lineal (naranja) y la aplicando la siguiente expresión:

$$DCR_{Eqv} = 2 + 6.67 \sum A_i \qquad (2)$$

donde *Ai* es el área de cada curva en la zona no lineal.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de las áreas de aporte de cada curva utilizadas para el cálculo del DCR equivalente. Como se observa, el valor del DCR equivalente depende de la contribución de cada curva. Este valor se puede interpretar como la abscisa en la que se produce la intersección de una recta equivalente con el eje de DCR, como se ilustra en la figura 6. Es decir, si todas las curvas se encuentran dentro de la zona de análisis lineal, el valor del DCR equivalente será igual a 2, ya que el aporte de cada curva es nulo.

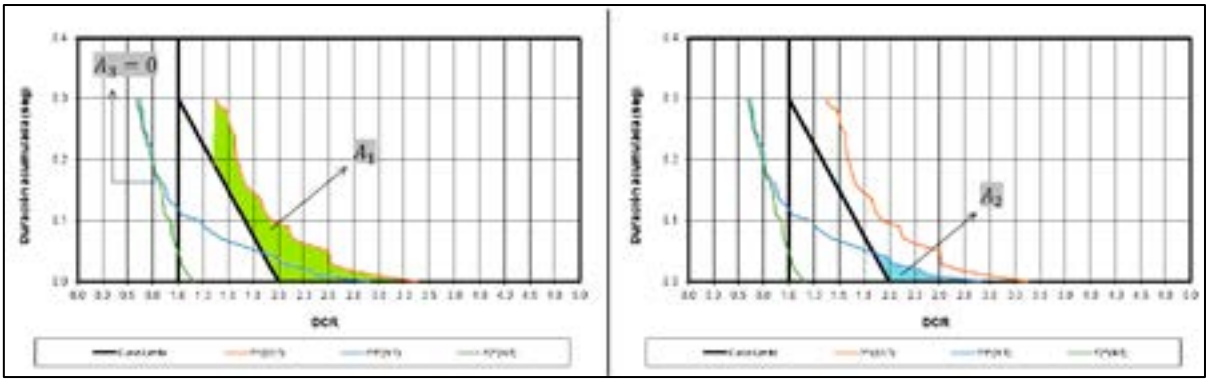


Figura 5 - Representación de las áreas a considerar en el cálculo del DCR equivalente

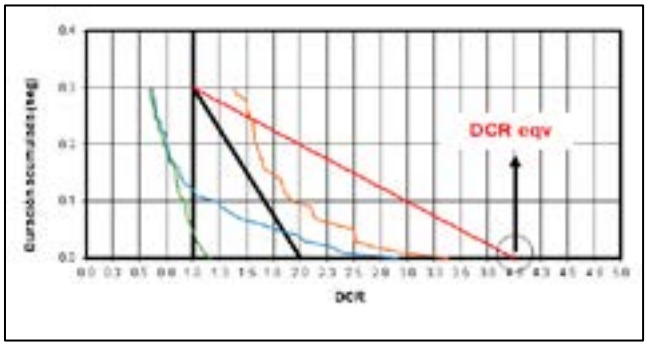


Figura 6 - Representación del DCR equivalente en la gráfica propuesta por la USACE

Resultados y discusión

El objetivo principal es realizar una evaluación comparativa del desempeño sísmico de presas de hormigón mediante el uso de metodologías lineales, representadas por el índice DCR, y no lineales, a través del parámetro VDG. Para ello, se empleará el DCR equivalente (DCR Eqv) como herramienta de comparación con el VDG, dado que este considera el aporte de cada punto en el análisis no lineal. Asimismo, se busca establecer una correlación entre los modelos lineales y no lineales, de manera que sea posible, a partir de un modelo lineal, obtener información preliminar sobre el desempeño de la presa en condiciones no lineales, evitando la necesidad de realizar análisis no lineales complejos.

En la Figura 7 se presentan los resultados en términos de deformaciones en el tiempo y paramento aguas arriba para una presa de 75 m de altura con pendiente 0.75, sometida al sismo 5. Se observa cómo varían los valores de VDG y los correspondientes valores de DCR eqv. En los casos 3 y 4, donde se modificó la componente vertical del acelerograma, se evidencian aumentos significativos en las deformaciones de la presa, lo que indica un incremento considerable del daño. En este caso los valores de DCR eqv cercanos a 8 pueden asociarse a grandes deformaciones, las cuales, a su vez, corresponden a valores de VDG superiores a 0.25. Estos valores de valor de daño global (VDG) se vinculan con patrones de daño significativos, tal como se detalla en el trabajo "Modelación de respuesta sísmica de presas de hormigón en régimen no lineal en ABAQUS", y que también se refleja en la Figura 7.

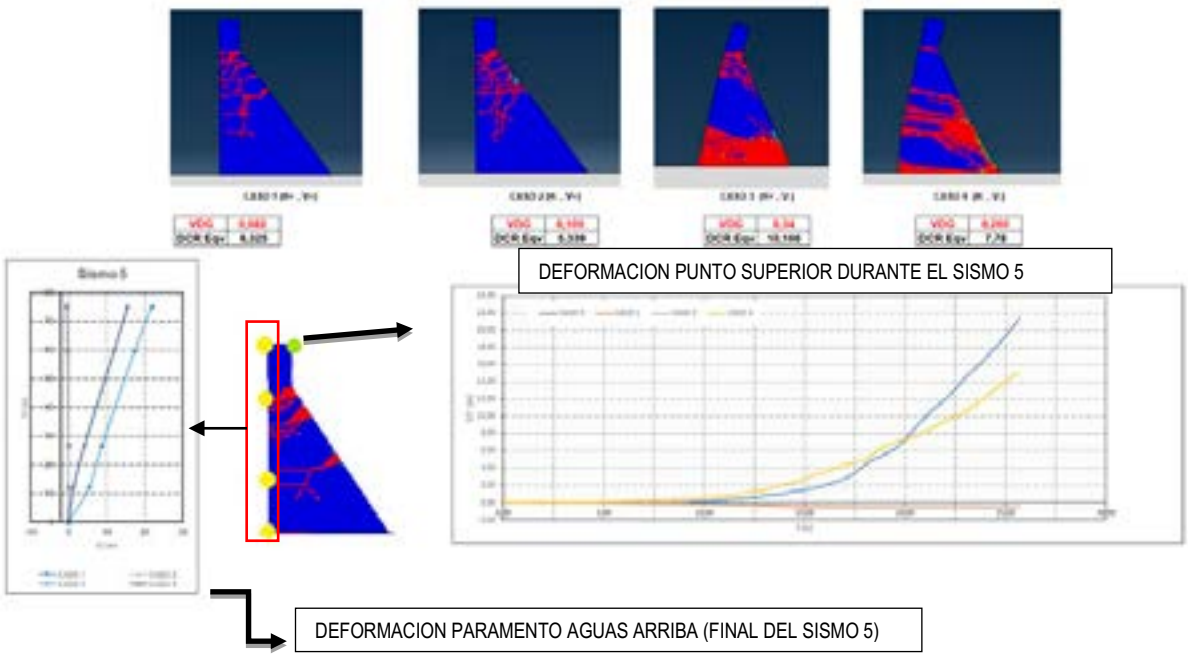


Figura 7 - Resultado de presa 75 m con pendiente = 0.75

Continuando con la búsqueda de una correlación entre las metodologías propuestas, se analizaron 400 modelos: 80 modelos lineales y 320 modelos no lineales. Estos últimos se dividen en cuatro casos, variando las componentes de los acelerogramas. A partir de los modelos lineales, se obtiene el DCR y, por ende, el DCR eqv, mientras que, con los modelos no lineales, se obtiene el VDGVDGVDG, lo que permite cuantificar el daño global.

En la Figura 8 se presentan las gráficas de DCReqv – VDG para cada sismo y altura de la presa, junto con sus respectivas curvas de tendencia lineal. A partir del valor de R^2, se puede hacer una conclusión parcial: en sismos de baja intensidad, como el sismo 1, la relación entre las variables no es significativa en términos lineales. En estos casos, las metodologías lineales son aplicables, y no es necesario recurrir a modelos no lineales más costosos.

En sismos de intensidad moderada a ala, la correlación entre las variables mejora significativamente, lo que indica que el método propuesto puede aplicarse de manera efectiva. En estos casos, a partir de un modelo lineal de la presa es posible obtener información sobre su respuesta en condiciones no lineales, facilitando la evaluación de la viabilidad del diseño en términos de deformaciones remanentes, patrones de daño y estabilidad estructural.

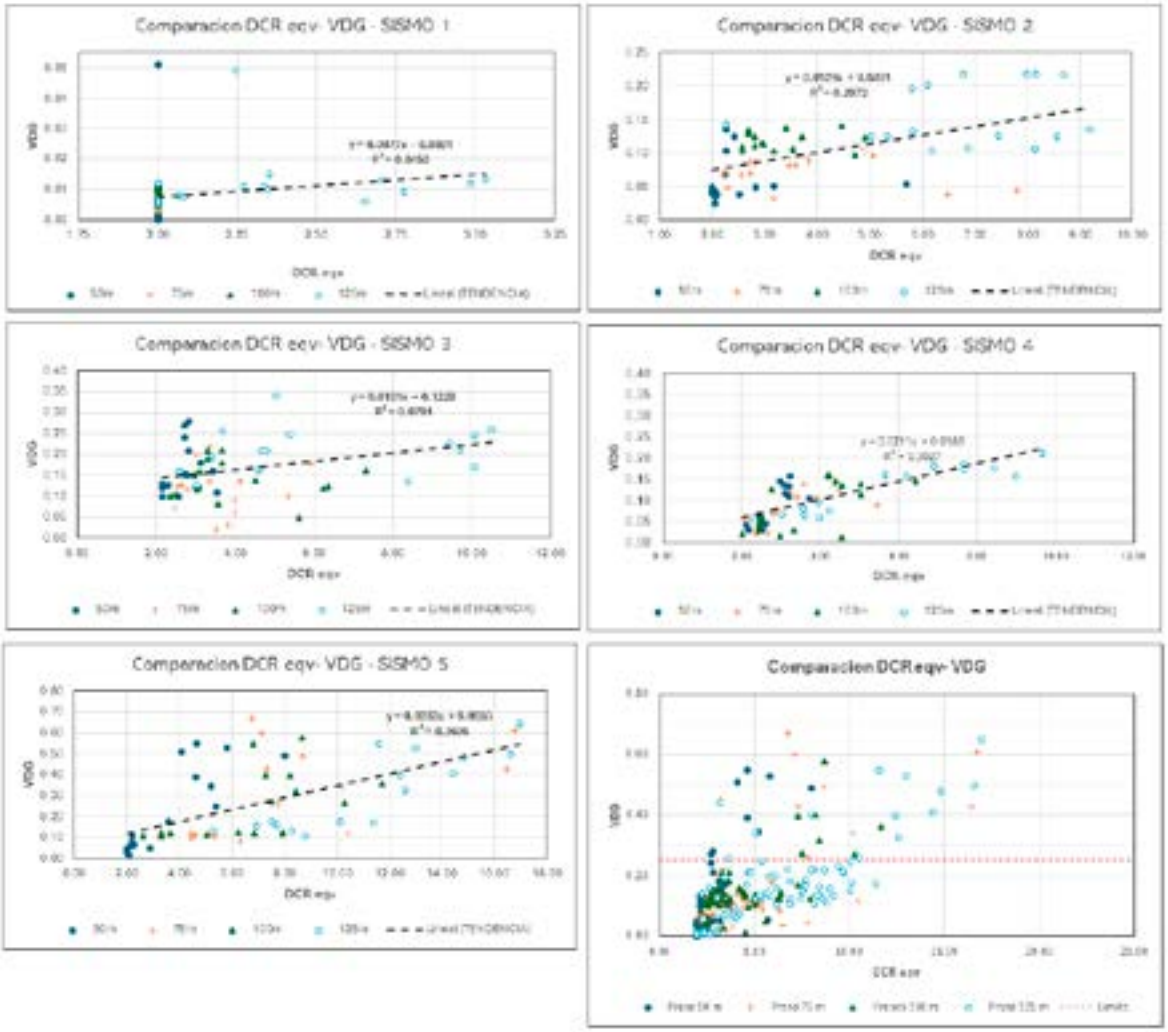


Figura 8 - Resultados de DCR eqv- VDG para cada sismo

Conclusiones

La metodología propuesta en este estudio, denominada DCR eqv, buscaba vincularse con el parámetro de valor de daño global (VDG). Los resultados obtenidos indican una mejor correlación en sismos de mediana a alta intensidad, lo que sugiere que esta metodología podría servir como punto de partida para desarrollar un modelo lineal de la presa. Dicho modelo permitiría obtener información sobre el daño, las deformaciones remanentes y la estabilidad de la estructura, sin incurrir en el elevado costo computacional asociado a la simulación de un modelo no lineal.

Bibliografía

1] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume III: Materials. Dassault Systèms Simulia Corp., (2013).
[2] USACE. Earthquake Design and evaluation of concrete hydraulic structures (2007).
[3] A. Chopra. Simplified Analysis for Earthquake resistant design of concrete gravity dams (1986).
[4] K. Vivas, JF Bissio, E.I. Villa, C. Rocco. Análisis y comparativa de metodología en el desempeño sísmico de presas de hormigón con modelación numérica en ABAQUS (2025).
[5] JF Bissio. El Diseño de presas en zonas de alta sismicidad. (2013).

DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA REPRESENTACIÓN DE CAMPOS VECTORIALES ORIENTADOS AL ANÁLISIS DE EXPANSIONES URBANAS

Pedro Chévez

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC CONICET-UNLP). Calle 47 n 162, CP. 1900, La Plata, Buenos Aires | Cátedra de Edificios. Departamento de Ingeniería Civil (FI UNLP).

chevezpedro@gmail.com

Introducción

El crecimiento y la expansión urbana son analizados por diversas disciplinas tales como la geografía, la economía, el urbanismo, la ingeniería, etc.; y suele abordarse bajo el concepto de cambios de uso del suelo. Para su estudio, existen distintos tipos de modelos. Estos pueden ser estadísticos y econométricos, de interacción espacial, de optimización, integrados y otros. Dentro de esta última categoría se incluyen los modelos basados en ciencias naturales, los cuales permiten diversas aplicaciones mediante extensiones en los sistemas de información geográfica, como el análisis espacial, estadístico y de campos vectoriales.

Se identifican escasos trabajos que aborden la utilización de campos vectoriales sobre soportes SIG, en particular con un enfoque temporal. A continuación, se enumeran algunos casos, como el de Zhong et al. (2012), quienes mostraron campos vectoriales para el drenaje urbano de agua. En el trabajo de Liu et al. (2015), se propone un campo vectorial para visualizar el impulso de la demanda geográfico-temporal en los sistemas de transporte a partir de trayectorias observadas de una población. Por su parte, el trabajo de Mazzoli et al. (2019) aborda el mapeo de flujos diarios de desplazamientos al trabajo a partir de un campo vectorial.

Por último, podemos mencionar el trabajo de autoría propia (Chévez y Barbero, 2017), donde se evaluó un método que utiliza técnicas manuales de recolección de datos y procesamiento para la graficación de campos vectoriales en sectores urbanos de pequeña escala. En relación con lo señalado anteriormente, el presente trabajo pretende avanzar a partir del desarrollo de un algoritmo para la representación de campos vectoriales que permitan graficar las dinámicas de expansión urbana y, así, brindar una herramienta que sirva para el análisis de este fenómeno en el territorio.

Parte experimental: construcción y principio de funcionamiento del algoritmo

Esta sección describe, primero, el dataset utilizado para diseñar el algoritmo y la estructura del código; en segundo lugar, se muestra un ejemplo para una pequeña porción ficticia de 3x3 píxeles.

Descripción del conjunto de datos y del algoritmo

Este análisis se basa en los datos del World Settlement Footprint (WSF) Evolution, el cual contiene mapas raster de 30 metros por píxel. Estos muestran la extensión global de los asentamientos humanos año a año desde 1985 hasta 2015. El WSF Evolution fue generado a partir de imágenes satelitales de Landsat-5 y Landsat-7, lo que permite obtener una representación detallada del crecimiento urbano a lo largo del tiempo. El dataset completo está organizado en 5138 archivos GeoTIFF con proyección

EPSG4326, cada raster cubre una región de 2x2 grados (~222x222 km) y cada píxel tiene un valor entre 1985 y 2015, que indica el año estimado en el que la zona fue identificada como urbanizada. Los píxeles con valor 0 representan áreas no urbanizadas o sin datos.

Este código fue diseñado para analizar y modelar la expansión urbana, permitiendo identificar patrones de crecimiento y direcciones predominantes de urbanización en distintos periodos. El propósito general del algoritmo es recorrer una imagen raster en formato .tif para analizar el patrón de expansión urbana píxel por píxel, analizando su propio año de consolidación y el de sus ocho vecinos circundantes. De esta forma, se genera un campo vectorial que representa la dirección y magnitud del crecimiento de la urbanización.

La sección central del código se transcribe a continuación:

```
for i in range(1, rows - 1):
    for j in range(1, cols - 1):
        central_value = img[i, j]
        if central_value > 0:
            vector_x = 0
            vector_y = 0
            valid_vectors = 0
            for dx, dy in [(-1, -1), (-1, 0), (-1, 1), (0, -1), (0, 1), (1, -1), (1, 0), (1, 1)]:
                nx, ny = i + dx, j + dy
                if 0 <= nx < rows and 0 <= ny < cols:
                    neighbor_value = img[nx, ny]
                    if neighbor_value > 0 and neighbor_value > central_value:
                        year_difference = abs(neighbor_value - central_value)
                        if year_difference > 0 and (2015 - neighbor_value) >= 0:
                            magnitud = (1 / year_difference) * (1/(2015 -
neighbor_value + 1))
                            vector_x += magnitud * np.cos(np.arctan2(dy, dx))
                            vector_y += magnitud * np.sin(np.arctan2(dy, dx))
                            valid_vectors += 1
                                if valid_vectors > 0:
                                    center_x = j + 0.5  # Centrar en el píxel
                                    center_y = i + 0.5  # Centrar en el píxel
                                    lon, lat = transform * (center_x, center_y)
                                    line = LineString([Point(lon, lat), Point(lon + vector_x,
                lat + vector_y)])
                                    features.append(geojson.Feature(geometry=line,
                properties={"magnitude": np.sqrt(vector_x**2 + vector_y**2)}))
```

El algoritmo recorre la imagen, y lo primero que se hace es desestimar los bordes del archivo, ya que allí no se cumple la condición de contar con 8 píxeles circundantes.

Luego, una vez identificado el primer píxel válido dentro de la imagen, se obtiene su valor y se verifica que sea mayor que 0, lo que indica que es un píxel consolidado y debe ser analizado. Si el valor es 0, se trata de un área no urbanizada, por lo que no se realiza ningún cálculo y se pasa al siguiente píxel.

En caso de cumplir con esta condición, se inicializan tres variables:

- vector_x y vector_y, que almacenarán la dirección del crecimiento urbano en los ejes X e Y, respectivamente.
- valid_vectors, que llevará un conteo de cuántos vecinos cumplen con los requisitos para ser considerados en el cálculo del vector de expansión.

Posteriormente, se analizan los 8 píxeles vecinos al píxel central para determinar si presentan una consolidación más reciente. Para esto, se recorre la lista de 8 direcciones posibles (arriba, abajo, izquierda, derecha y diagonales), sumando dx y dy a las coordenadas (i, j) del píxel actual.

Antes de evaluar el vecino, se verifica que sus coordenadas (nx, ny) estén dentro de los límites de la imagen, para evitar errores de acceso a posiciones fuera de la matriz. Si el píxel vecino también es consolidado (neighbor_value > 0) y su valor es mayor que el del píxel central (neighbor_value > central_value), significa que representa una urbanización más reciente, es decir que la urbanización avanzó en esa dirección. En este caso, se calcula la diferencia de años entre el píxel vecino y el central (year_difference = abs(neighbor_value - central_value)).

Si esta diferencia es mayor a 0 y el vecino no representa un año posterior a 2015, se procede a calcular la magnitud del vector de expansión del píxel central respecto a cada vecino usando la Ecuación 1:

$$\text{magnitud} = \frac{1}{\text{year_difference}} * \frac{1}{(2015 - \text{neighbor_value} + 1)} \qquad (1)$$

La Ecuación 1 asigna más peso a las consolidaciones que se dieron más rápido: cuanto menor sea la diferencia de años (year_difference) -es decir, el tiempo que tardó en consolidarse-, mayor será la magnitud del vector. A su vez, la ecuación también asigna más peso a las consolidaciones más recientes -es decir, que se dieron más cercanas a 2015 (último disponible en el raster)-; siendo que, si la consolidación se dio en el último año, esta sección de la ecuación adquiere el máximo valor posible (1). Aquí se grafica la función utilizada, a los efectos de identificar el comportamiento de las variables (Figura 1).

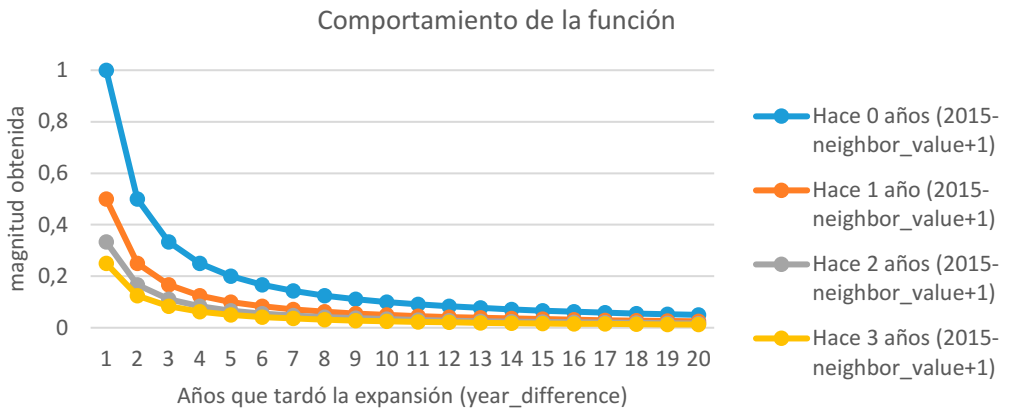


Figura 1. Comportamiento de la función propuesta.

Luego, se calcula la descomposición de cada vector en sus componentes X e Y, utilizando funciones trigonométricas para determinar la dirección:

- vector_x acumula la componente horizontal, usando cos(θ).
- vector_y acumula la componente vertical, usando sin(θ).

Cada vez que un vecino aporta información válida para el cálculo del vector, se incrementa el contador valid_vectors. Al finalizar la evaluación de todos los vecinos, si valid_vectors > 0 (es decir, si al menos un vecino contribuyó a la expansión urbana), se establece el punto para posicionar el vector en el centro del píxel y se convierten las coordenadas del píxel de la imagen a coordenadas geográficas utilizando la matriz de transformación. Por último, se genera un archivo GeoJSON con la colección de vectores obtenidos, y se guarda en la ruta especificada para su análisis posterior. El script finaliza imprimiendo la ubicación donde se guardó el archivo.

Aplicación sobre de un ejemplo de nueve celdas

Simulamos una pequeña parte de un hipotético .tif. En este sentido, la Figura 2 presenta las posiciones de nueve píxeles, siendo el píxel central (0,0) el que se evalúa, cuyo año de consolidación fue en 2010. En primer lugar, el píxel (0,0) cuenta con un valor mayor a 0 (su valor es 2010), por ende es analizado.

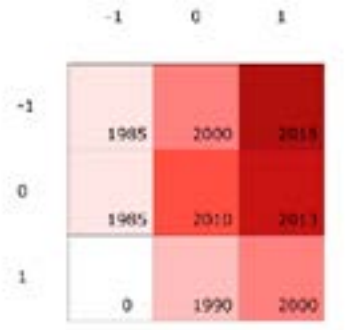


Figura 2. Valores de consolidación de los nueve píxeles.

Luego, el algoritmo verifica si cada vecino cumple con las condiciones establecidas. Para ser evaluados, estos deben ser, diferentes de 0 (se consolidaron) y, en este caso, mayores que 2010 (valor del píxel central). En este sentido, aquellos que cumplen con dicha condición son los de la posición (0,1)=2013 y (-1,1)=2015.

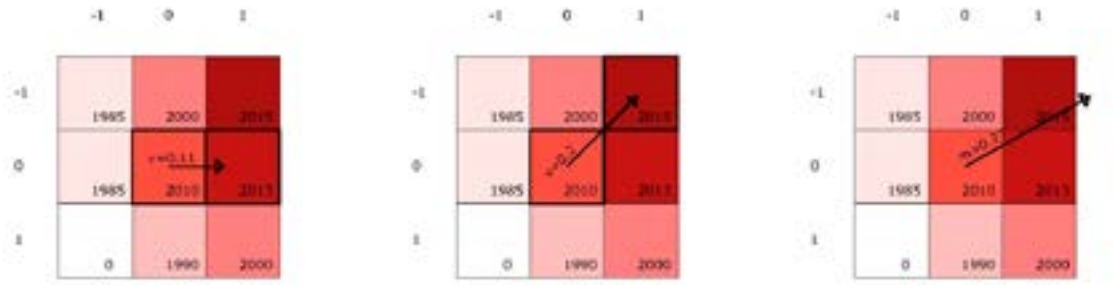
Para el vecino en (0, 1) con valor 2013, la diferencia de años entre este píxel y el central es 3 años (2013 - 2010). Es decir que el pixel central tardó 3 años en expandirse. A partir de esta diferencia, calculamos la magnitud de la contribución de este vecino al vector de expansión. La fórmula utilizada para calcular la magnitud es (1/3*1/3=1/9). Dado que este vecino está directamente a la derecha del píxel central (0, 0), su dirección de expansión será solo en el eje x, es decir, el vector_x=0.11 y vector_y = 0. Ver parte A de la Figura 3.

Luego, para el vecino en (-1, 1) con valor 2015, la diferencia de años con respecto al píxel central es 5 años (2015 - 2010). La magnitud para este vecino se calcula con la fórmula (1/5*1=1/5). Este vecino está en la diagonal superior derecha del píxel central, lo que significa que la expansión ocurre tanto en los ejes x como y. Usamos la función arctan2(dy, dx) para calcular la dirección del vector, donde dx y dy son los desplazamientos en x y y desde el píxel central. En este caso, dx = 1 y dy = 1, lo que resulta en un ángulo de 45°, correspondiente a una dirección diagonal hacia la parte superior derecha de la imagen. La magnitud en cada dirección (x e y) se obtiene multiplicando la magnitud total 1/5 por los cosenos y senos del ángulo de 45°, lo que resulta en vector_x = 0.14 y vector_y = 0.14. Ver parte B de la Figura 3.

Finalmente, para obtener el vector total de expansión del píxel central, sumamos las contribuciones de ambos vecinos válidos (∑vector_x = 0.14+0.11=0.25 y ∑vector_y = 0.14). La suma total del vector de expansión descompuesta en dos direcciones permite reconstruir la magnitud del vector resultante por Pitágoras. Ver parte C de la Figura 3.

$$\text{Resultante} = \sqrt{\sum \text{vector_x}^2 + \sum \text{vector_x}^2} \qquad (2)$$

La Figura 3 muestra el cálculo para los dos píxeles vecinos y el vector resultante.



(A) Cálculo con el píxel vecino (0,1)

(B) Cálculo con el píxel vecino (1,1)

(C) Cálculo de la resultante del píxel central (0,0)

Figura 3. Procedimiento de cálculo del ejemplo de nueve píxeles.

Una vez expuesto el funcionamiento del algoritmo, a continuación, se presentan su implementación sobre un sector urbano localizado en la ciudad de La Plata.

Resultados y discusión: aplicación del algoritmo sobre el territorio.

La Figura 4 y 5 muestran la aplicación del algoritmo sobre dos sectores de la ciudad de La Plata. En ambos casos se identifica el raster de consolidación y el campo vectorial, ambos hasta 2015) y una imagen satelital ofrecida por Google, que corresponde a 2025. Esto permite analizar de qué manera evolucionó efectivamente el sector.

En la Figura 4 se observa un sector cuya consolidación había ocurrido mayormente la década del noventa, y sufrió un importante proceso de expansión en los años 2014/2015 en su borde noroeste. Tal y como advertía la tendencia de crecimiento a 2015 (último dato disponible del raster), la expansión que se observa en la imagen de fondo (de 2025) ocurrió hacia dicho sector, el cual limita con un arroyo.



Figura 4. Representación del campo vectorial sobre dos sectores urbanos

La Figura 5 muestra un sector urbano cuya consolidación se dio principalmente entre los años 2010 y 2015. Allí se observa un sector central sobre el cual se esperaba una consolidación, pero que a 2025 no verifica haberse ocupado. Esto se debe a que dicho espacio es un club de fútbol sobre el cual no avanzó la urbanización. En tanto, en el extremo noreste se terminó de conformar el perímetro del barrio, tal como señalaban algunos vectores de dicho sector y cuyos límites están demarcados por canteras.

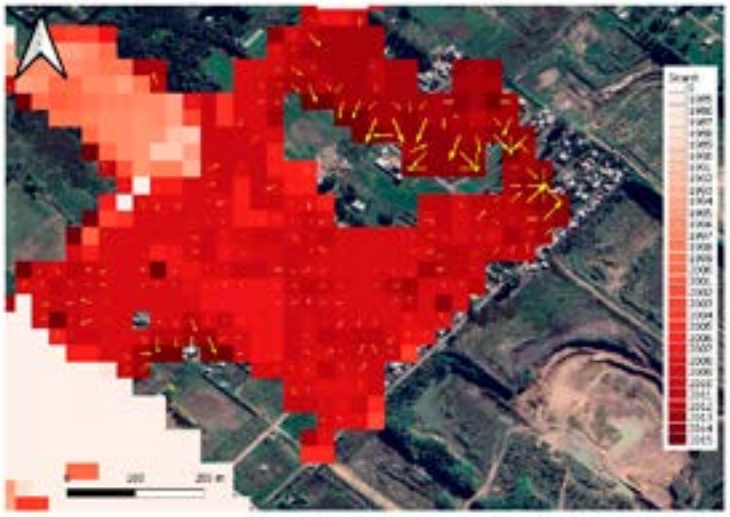


Figura 5. Representación del campo vectorial sobre dos sectores urbanos

A partir de la breve evaluación del crecimiento de los dos sectores observados, es posible visualizar que los campos vectoriales indicaron tendencias de crecimiento hacia sectores de alta vulnerabilidad ambiental, como pueden ser arroyos o canteras. En este sentido, a partir de la actualización de la información a partir de nuevos conjuntos de datos y del análisis de sectores de riesgo sería posible determinar puntos de crecimiento conflictivos para establecer medidas para reducir el impacto de posibles efectos negativos.

Conclusiones

El presente trabajo aporta una nueva herramienta para el análisis de la expansión urbana mediante la representación de campos vectoriales sobre un SIG. Su implementación permite identificar patrones de crecimiento y direcciones predominantes de urbanización, lo que resulta útil para la planificación territorial, el monitoreo de dinámicas urbanas y la toma de decisiones en políticas de desarrollo urbano. Se espera en próximas investigaciones poder implementar el algoritmo sobre sectores urbanos más amplios y aplicarlo sobre diferentes casos de estudio a los efectos de indagar acerca de su efectividad para analizar y explicar el fenómeno social. En dicha aplicación, será necesario construir campos vectoriales con píxeles de mayor cobertura, a los efectos de identificar tendencias urbanas más generales.

Bibliografía

Zhong, C., Wang, T., Zeng, W., Arisona, S. (2012). Spatiotemporal visualisation: a survey and outlook. En Stefan Müller Arisona, Gideon Aschwanden, Jan Halatsch, Peter Wonka (Eds.). Digital Urban Modeling and Simulation. Springer, pp. 299-317

Liu, X., Yan, W., Chow, J. (2015). Time-geographic relationships between vector fields of activity patterns and transport systems. Journal of Transport Geography (42), pp. 22-33.

Mazzoli, M., Molas, A., Bassolas, A. et al. (2019). Field theory for recurrent mobility. Nat Commun 10, 3895.

Chévez, P. y Barbero, D. (2017). Identificación de tendencias de crecimiento de sectores urbanos mediante campos vectoriales. Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG) (9), pp. 1-10.

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DE LA RED DE CAMINOS RURALES EN LA REPÚBLICA POPULAR CHINA EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS.

Williams, Eduardo, Larsen, Diego, Capra, Bernardino, Martínez, Ricardo, López, Mariano, Frígoli Albert, Elisa.

UIDIC- Unidad de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Civil. Calle 48 y 115.
Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. UNLP
williams@ing.unlp.edu.ar

Los caminos rurales constituyen la red de infraestructura de transportes más importante de China. Esta República es uno de los países con mayor población del mundo y tiene una superficie de aproximadamente 9,6 millones de kilómetros cuadrados.
El territorio de China es muy diverso. El 40% de su relieve es montañoso, con más de 2000 m de altitud. Los desiertos ocupan el 11,4 % del país. En el norte y oeste existen planicies áridas. En el este, predominan las llanuras de poca altitud donde se concentra la mayoría de la población y la agricultura intensiva. En esta región, los tres principales ríos chinos desembocan en el mar, formando deltas.
El centro de China es, en promedio, menos elevado que las regiones occidentales del país. El relieve está formado por montañas medianas, mesetas, colinas y depresiones.
En los últimos días de noviembre la Oficina del Consejo de Estado de China informó que la longitud de la red de caminos rurales se incrementó, desde 2012, en 3,68 millones de kilómetros. Con un total de 4,6 millones de kilómetros en la actualidad.
En el presente trabajo se analizan las características y estrategias de crecimiento de la red de caminos rurales de la República Popular de China en los últimos años.

1. Introducción

Los caminos rurales sin peaje en China representan la mayor parte de la infraestructura de transporte y son esenciales para el uso de la población rural. Facilitan la movilidad, mejoran la calidad de vida y apoyan la modernización agrícola.
A 75 años de su nacimiento, la República Popular China ha logrado construir desde cero una red de caminos accesibles y de alta calidad.
A partir del XVIII Congreso Nacional del PCCh en 2012, el país ha impulsado un desarrollo de alta calidad en estos caminos, con mejoras en cobertura, accesibilidad, mantenimiento y seguridad. El gobierno ha aplicado estrategias innovadoras y planificación integral para optimizar la infraestructura rural.
Los caminos rurales no sólo conectan territorios, sino que también sustentan el crecimiento económico y generan la prosperidad del pueblo. China ha desarrollado un modelo de infraestructura adaptado a sus condiciones, ofreciendo soluciones para la reducción global de la pobreza.

2. La estrategia China

China ha impulsado la construcción de caminos rurales como parte de su estrategia de erradicación de la pobreza y revitalización rural. Desde la reforma y apertura en 1978, se han implementado iniciativas clave que han permitido la expansión de la red vial rural, alcanzando 4,6 millones de km en 2023.
El desarrollo se ha basado en cinco pilares: enfoque centrado en las personas, garantizando acceso equitativo al transporte; planificación estratégica, alineando la construcción vial con el desarrollo económico y social; adaptación a condiciones locales, considerando factores económicos y ambientales; reforma e innovación, mejorando gestión y financiamiento; y coordinación y colaboración, integrando esfuerzos del gobierno, sector privado y comunidades.

Estas políticas han mejorado la conectividad de las zonas rurales, facilitando el acceso a servicios, el transporte de bienes y la integración urbano-rural, impulsando el crecimiento económico sostenible.

China ha avanzado significativamente en la construcción y rehabilitación de caminos rurales. En la última década, ha construido y mejorado más de 2.5 millones de kilómetros de caminos, alcanzando un total de 4.6 millones de km para finales de 2023, un aumento del 21,7 % con respecto a 2013. Estos valores representan unos 250 mil km por año y aproximadamente 700 km por día. El volumen total construido fue de 700.000 km de caminos provinciales, 1,24 millones de km de caminos municipales y 2,66 millones de km de caminos rurales. Con un total de 530.000 puentes y 2.222 túneles en las zonas rurales. La mayoría de estos caminos tienen buenos estándares de transitabilidad, con un 91.8 % de las mismas pavimentadas. Se ha establecido una red de infraestructura de transporte rural, en la que los caminos provinciales conectan las zonas rurales con las urbanas, los caminos municipales se entrecruzan y las caminos rurales facilitan el desplazamiento entre los hogares y las tierras de cultivo.

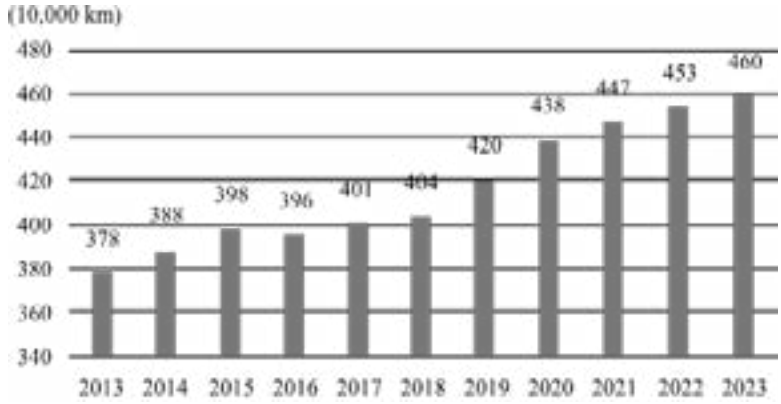


Figura 1. Crecimiento de la longitud de Caminos Rurales. Office of the People's Republic of China.(2024)

El desarrollo se ha basado en una planificación sistemática, con metas a mediano y largo plazo, asegurando conectividad entre aldeas, municipios y centros económicos. Se ha priorizado la equidad regional, brindando apoyo especial a áreas remotas, montañosas y en proceso de revitalización rural. Además, China ha promovido caminos sostenibles mediante regulaciones estrictas, estándares técnicos elevados y el uso de materiales ecológicos.
Estos esfuerzos han reducido la brecha entre zonas urbanas y rurales, facilitado el acceso a transporte público y fomentado el crecimiento económico en comunidades aisladas.

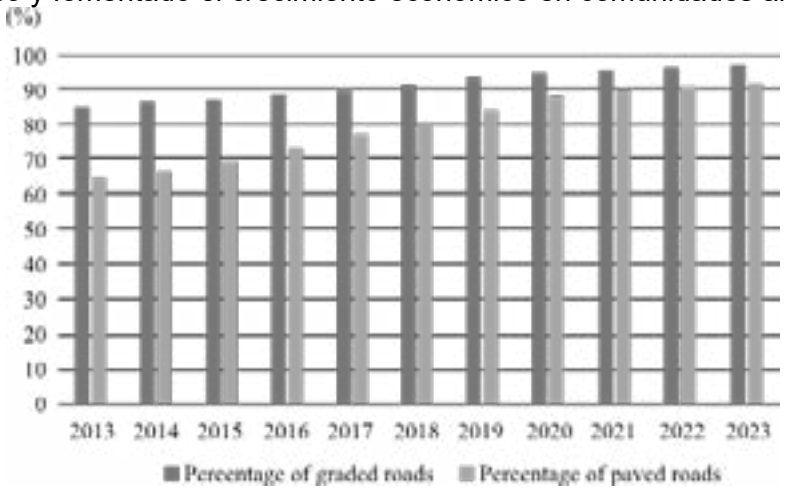


Figura 2 Porcentaje de caminos consolidados y caminos pavimentados. Office of the People's Republic of China. (2024)

3. Gestión

China ha desarrollado una gestión eficiente para sus caminos rurales mediante un marco legal y regulatorio sólido, mecanismos de financiamiento diversificados, transformación digital y proyectos piloto innovadores.

Sistema legal y regulatorio: Ha establecido un marco integral con leyes nacionales, regulaciones administrativas y normativas locales. Se han emitido más de 20 políticas para mejorar la gestión y mantenimiento, incluyendo el sistema de "jefes de camino" para garantizar coordinación interdepartamental.
Mecanismo de financiamiento: La financiación proviene del gobierno central y local, con apoyo mediante impuestos y transferencias. Se han establecido estándares mínimos de financiamiento y explorado fuentes privadas a través de proyectos comerciales y seguros contra desastres.

El apoyo financiero lo brindan distintos niveles de gobierno. La financiación gubernamental desempeña un papel crucial en la construcción y el mantenimiento de caminos rurales. El gobierno central ha asignado fondos a través de diversos canales, incluyendo los ingresos del impuesto sobre la compra de vehículos, la inversión presupuestaria central y los pagos de transferencia de la reforma de impuestos y tasas relacionados con los productos petrolíferos refinados. Los gobiernos provinciales, municipales también han aumentado su apoyo financiero al desarrollo de caminos rurales. Los gobiernos locales han incorporado los gastos operativos y los costos básicos de personal de las agencias de gestión de caminos rurales en sus presupuestos públicos generales y han priorizado el desarrollo de caminos rurales en sus planes generales de emisión de bonos. Se ha implementado un estándar mínimo anual de financiación de mantenimiento de RMB10,000 (u$s 1.400) por kilómetro para caminos de provincia, RMB5,000 (u$s700) por kilómetro para caminos de municipio y RMB3,000 (u$s420) por kilómetro para caminos de pequeñas localidades. El gobierno central también ha brindado orientación a los gobiernos locales para maximizar el uso efectivo de los fondos de subsidio al transporte rural de pasajeros. Durante la última década, se ha invertido un total de 4,3 trillones de RMB en activos fijos de caminos rurales, y 1,1 trillones de RMB en mantenimiento. Aproximadamente el 80 % de la financiación total en ambas categorías proviene del gobierno. El gobierno central aporta 8.9 billones de RMB (u$s1.246.000 millones) anuales en subsidios para el transporte rural de pasajeros.

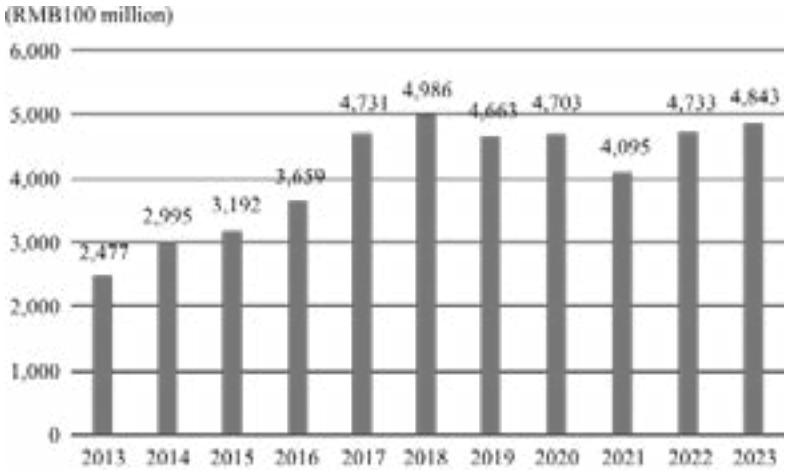


Figura 3. Inversión en Infraestructura Vial. Office of the People's Republic of China. (2024)

Transformación digital**:** Se han implementado tecnologías avanzadas como inteligencia artificial y monitoreo en tiempo real para mejorar la eficiencia en la gestión y mantenimiento de caminos.
Proyectos piloto y demostrativos: Se han designado regiones modelo y lanzado programas piloto para probar innovaciones en infraestructura, financiamiento y mantenimiento.
Este enfoque ha permitido mejorar la planificación, construcción y mantenimiento de caminos rurales, fortaleciendo el desarrollo rural y la integración con zonas urbanas.

4.Seguridad, durabilidad y comodidad de la infraestructura vial

China ha avanzado en la mejora y mantenimiento de sus caminos rurales, asegurando mayor seguridad, durabilidad y comodidad para los viajeros. A través de inversiones estratégicas, la aplicación de tecnología avanzada y un enfoque integral de mantenimiento, el país ha optimizado la infraestructura vial en zonas rurales, fortaleciendo su capacidad de servicio y respuesta ante emergencias.
En cuanto a las mejoras en Infraestructura y Seguridad Vial, en la última década, China ha reparado y mantenido 1,84 millones de km de caminos rurales, elevando la proporción de vías en buen estado del 79 % al 91,1 %. La inversión en mantenimiento ha permitido implementar proyectos que representan más del 5 % del kilometraje total cada año. Como resultado, los caminos rurales ofrecen ahora un entorno más limpio, ordenado y funcional.
En términos de seguridad, se han eliminado peligros viales y reforzado medidas preventivas. Entre 2013 y 2023, los accidentes de tráfico con más de tres muertes se redujeron un 36,5 %, mientras que los incidentes con más de 10 fallecidos disminuyeron en un 85,7 %. Estas mejoras han sido posibles gracias a la modernización de la infraestructura de seguridad, como señalización, reductores de velocidad y semáforos, así como la renovación de 58.000 puentes rurales, lo que aumentó su durabilidad y resistencia estructural.
Por otra parte, el mantenimiento de los caminos rurales en China sigue un enfoque basado en datos, utilizando inteligencia artificial (IA) y big data para optimizar la planificación y ejecución de proyectos. En 2023, el 70 % de la evaluación del estado del pavimento se realizó de forma automatizada, permitiendo intervenciones más precisas y eficientes.
China ha desarrollado vehículos y dispositivos portátiles automáticos para inspeccionar las vías, mejorando la supervisión del mantenimiento y el transporte. Asimismo, ha estandarizado regulaciones mediante normas técnicas que establecen criterios específicos para la evaluación y reparación de caminos rurales.
El mantenimiento preventivo es una prioridad para prolongar la vida útil de los caminos.
Se han implementado técnicas como el reciclaje en frío y en caliente del pavimento asfáltico y rubblización para la repavimentación con mezcla asfáltica de pavimentos de hormigón. También se han empleado tecnologías de reciclaje de residuos para reutilizar materiales de pavimento, neumáticos desgastados y desechos industriales. Además, se han introducido nuevos equipos, como máquinas pavimentadoras avanzadas y equipos para rellenado de grietas, logrando menores costos y tiempos de ejecución más cortos.
China ha diversificado los modelos de gestión del mantenimiento vial, combinando esfuerzos del gobierno y el sector privado. Se han adoptado licitaciones para asignar proyectos de mantenimiento a equipos profesionales, además de implementar contratos globales por zonas y estrategias conjuntas para la construcción y el mantenimiento de caminos.
Este modelo orientado al mercado ha hecho que las operaciones sean más eficientes, reduciendo los tiempos de ejecución y mejorando la calidad del mantenimiento. También se ha impulsado la digitalización en la administración vial, facilitando la toma de decisiones basadas en análisis de datos.
Resiliencia y Preparación ante Desastres
China ha fortalecido su capacidad de respuesta ante desastres naturales y emergencias en caminos rurales. Se han establecido centros de reserva de emergencia en diferentes regiones y desarrollado brigadas especializadas en rescate. Además, se realizan inspecciones periódicas en zonas propensas a deslizamientos y climas extremos para prevenir incidentes.

Para garantizar la seguridad vial durante condiciones adversas, se emplean materiales antideslizantes y agentes anticongelantes en invierno. Asimismo, se han optimizado los sistemas de monitoreo y alerta temprana para activar rutas de emergencia y facilitar el transporte de ayuda humanitaria en situaciones críticas.
China ha logrado importantes avances en el mantenimiento y modernización de sus caminos rurales mediante un enfoque basado en tecnología, sostenibilidad y seguridad. La inversión en infraestructura, la automatización del mantenimiento, la optimización de modelos organizativos y la preparación ante desastres han permitido crear una red vial más confiable, eficiente y resiliente. Estos esfuerzos garantizan un transporte más seguro y cómodo para los habitantes de zonas rurales, contribuyendo al desarrollo económico y social del país.

5.Características del transporte de Pasajeros y Carga en Áreas Rurales

Sobre la base de mejorar el transporte de pasajeros y carga en zonas rurales, garantizando un acceso equitativo a los servicios de transporte y promoviendo un desarrollo equilibrado entre áreas urbanas y rurales se trabajaron en las siguientes líneas rectoras. Facilitar el viaje en zonas rurales, considerar el transporte rural como un servicio público esencial. Se han establecido redes de transporte de pasajeros con cobertura total, conectando provincias, ciudades y aldeas mediante ómnibus regulares, combis y servicios bajo demanda. En la última década, más de 1,100 ciudades y 45,000 aldeas se han integrado a estas redes, asegurando que todas las comunidades aptas tengan acceso a servicios de autobús.
Para garantizar la sostenibilidad, se han implementado subsidios para la compra de vehículos y la operación del transporte, así como modelos de financiamiento basados en desempeño. Se han adoptado modelos flexibles para áreas con baja demanda, como servicios locales y reservas anticipadas. Y se han atendido necesidades específicas, como transporte escolar y servicios estacionales. Además, se han extendido líneas urbanas hacia zonas rurales. La instalación de dispositivos de monitoreo y el desarrollo de sistemas de información han mejorado la seguridad y eficiencia del transporte. Para finales de 2023, había 342,000 vehículos en operación, con un aumento en la adopción de energías limpias.
Para mejorar la infraestructura logística, China ha construido 1,267 centros de distribución a nivel de provincias y 289,000 estaciones de servicio en localidades, aprovechando recursos locales como almacenes postales y cooperativas.
Se han desarrollado modelos innovadores para optimizar la logística rural, integrándola con el transporte de pasajeros y el comercio electrónico. Actualmente, existen 150 marcas de logística rural y nuevos modelos de servicio, como redes combinadas de pasajeros y carga, plataformas en línea y logística especializada en industrias locales. Estas mejoras han facilitado la modernización agrícola y el acceso de las aldeas al comercio digital.
A fin de equilibrar el transporte urbano y rural, China ha promovido la integración del transporte urbano y rural mediante directrices estratégicas que garantizan la conectividad o. Al cierre de 2023, el 93.6 % de las unidades administrativas a nivel de provincia habían logrado un buen nivel de integración del transporte urbano-rural.
Se han fortalecido las conexiones entre redes de transporte rural y urbano, incluyendo enlaces con estaciones ferroviarias, aeropuertos y terminales de ferry. En el ámbito logístico, se han desarrollado servicios especializados en comercio electrónico, entrega rápida y transporte de productos agrícolas mediante cadenas de frío.
Además, el gobierno ha impulsado la integración del transporte de pasajeros, carga y correo. Se han establecido mecanismos de cooperación entre los sectores de transporte, comercio y correos en todas las provincias y más del 70 % de las ciudades a nivel provincial. Con más de 11,000 líneas de transporte integradas y 90,000 estaciones de servicio, modelos como "pasajeros transportando correo" han reducido costos y aumentado la eficiencia logística, impulsando el comercio electrónico y la industrialización rural.

6. La interconexión de caminos como factor de prosperidad de la región

Los caminos rurales juegan un papel clave en el desarrollo económico y social, conectando paisajes, impulsando industrias locales y mejorando la calidad de vida. Su construcción proporciona un respaldo sólido para la modernización agrícola y la revitalización rural.
El desarrollo del transporte rural en China ha sido fundamental en la lucha contra la pobreza. Desde 2014, se han construido o mejorado más de 1.4 millones de km de caminos rurales en áreas previamente pobres, conectando a más de 45.000 pueblos y aldeas con servicios de autobús.
Mejores infraestructuras han atraído inversiones, proyectos y talento al campo, generando empleo y aumentando ingresos. Los gobiernos locales han promovido trabajos en la construcción y mantenimiento de caminos, beneficiando a unas 80,000 personas necesitadas con ingresos anuales adicionales de 8,500 yuanes y proporcionando empleo a 850.000 personas en la gestión vial con un ingreso promedio de 13,000 yuanes anuales.
Los caminos rurales son clave para el desarrollo económico y la modernización de las industrias locales. Se han implementado estrategias para integrar la infraestructura vial con la planificación territorial y los parques industriales, impulsando modelos como "Caminos rurales + Industrias locales". Esto ha facilitado el acceso a mercados y la expansión de actividades agrícolas y comerciales.
El turismo rural también se ha beneficiado enormemente. Se han diseñado rutas temáticas que conectan caminos con recursos culturales y naturales, atrayendo visitantes y convirtiendo aldeas en destinos turísticos. Además, la infraestructura vial ha facilitado la explotación eficiente de recursos naturales como la energía y los minerales, integrando los caminos con industrias locales para generar nuevas oportunidades económicas.
Asimismo, la planificación de caminos considera la integración con el paisaje natural y la identidad cultural local. Se han implementado programas de forestación y embellecimiento vial, mejorando el entorno de los pueblos y promoviendo el turismo y la habitabilidad rural.
El acceso a servicios públicos básicos ha mejorado notablemente. La expansión del transporte rural ha facilitado la movilidad de la población para acceder a educación y salud. Programas específicos como rutas escolares y transporte público especiales han reducido las dificultades de transporte en zonas remotas, promoviendo la igualdad educativa.
Finalmente, la interconectividad entre áreas urbanas y rurales ha reducido distancias y tiempos de viaje, fomentando el intercambio de personas, bienes y cultura. Esto ha transformado el estilo de vida rural, impulsando una integración equilibrada y promoviendo la prosperidad compartida entre el campo y la ciudad.

7. Conclusiones

China está impulsando la modernización de sus caminos rurales, mejorando la red vial, la seguridad, el transporte y la gestión de infraestructura. El crecimiento observado en la infraestructura vial en la última década no tiene precedentes en ningún otro país. Para 2035, proyecta contar con un sistema de transporte rural eficiente, sostenible y bien estructurado. A mediados de siglo, este será seguro, ecológico y adaptado a la modernización agrícola y rural, integrando tecnología y conservación ambiental. Con un enfoque de cooperación internacional, China buscará intercambiar conocimientos y modelos para el desarrollo de infraestructuras rurales, contribuyendo a la reducción de la pobreza y al fortalecimiento de una comunidad global con un futuro compartido.

Bibliografía.

Schulz, S. Prosperidad Común: el camino hacia el rejuvenecimiento de la nación china. CeChino (IRI-UNLP). Instituto de Relaciones Internacionales. Universidad Nacional de La Plata. (2024).

Staiano, María Francesca. Chinese Law and Its International Projection. CeChino (IRI-UNLP) (2023).

Merino, G, Regueiro Bello,L, Iglesias Wagner, T.(coords.) (2022) China y el nuevo mapa del poder mundial. Una perspectiva desde América Latina. CeChino (IRI-UNLP) y CLACSO-.

Brown, William N. (2021). Chasing the Chinese Dream. Four Decades of Following China's War. MBA Center. Xiamen University. Xiamen, China, 2021

Office of the People's Republic of China, The State Council Information. (2024).China's Rural Roads in the New Era. Office of the People's Republic of China, The State Council Information. Beijing. RPChina.

Schulz, S. (2025) , "Los nuevos pilares del desarrollo chino: innovación, civilización ecológica y prosperidad común", Boletín n°2 del Centro de Estudios de Investigación Sino-Latinoamericano. Universidad Nacional de Lanús. (CEISiL-UNLa).

CIÓN**PRODUCCIÓN**PRODU

PARTICIPACIÓN DE LOS TRABAJADORES EN LA SEGURIDAD Y LA SALUD EN EL TRABAJO – NUEVO INSTRUMENTO DE APOYO A LA DETECCIÓN DE NECESIDADES FORMATIVAS

Cappelletti, Daniel Ángel; Crespi, Mario Gabriel

Departamento de la Producción FI – UIDET: "FyEP" –
Calle 1 esq. 47 – 1er Piso– Edificio Central –
danielangelcappelletti@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un nuevo instrumento para la detección de necesidades de capacitación en pequeñas y medianas empresas. La Seguridad Integrada consiste en concebir que la Seguridad sea intrínseca e inherente a todas las modalidades de trabajo, por lo que las responsabilidades de Seguridad están en función de las competencias asumidas en el puesto de trabajo. El responsable del trabajo también lo es de la Seguridad necesaria para realizarlo, por lo que es válido el lema "La Seguridad es obra de todos", pero con una mejora consustancial: cada uno sabe la parte que le corresponde, sus funciones, los medios con los que cuenta.

La estructura de la capacitación que se propuso, partiendo del principio de garantizar una Seguridad Integrada para los centros de la industria es la de la capacitación extraordinaria, esta es recibida por todos los trabajadores en los casos en que ocurran situaciones no previstas que indiquen la necesidad de ejecutarla; cambio de proceso, equipamiento, materiales, inclusión de nuevas normas, regulaciones, como parte de la capacitación continua, sobre todo en ámbitos donde se han incrementado o no han bajado los índices de incidentes o accidentes.

En nuestro estudio, la organización de la capacitación en seguridad e higiene, se realizará con arreglo a la seguridad integral, y la estructura de la misma se encuadra dentro de las capacitaciones extraordinarias. El objetivo del trabajo, fue desarrollar con éxito la "Participación de los trabajadores en la seguridad y la salud en el trabajo, alcanzando un nuevo instrumento de apoyo a la detección de necesidades formativas en el ámbito laboral".

Desarrollamos un proceso de capacitación y entrenamiento sobre diagnóstico y corrección de problemas crónicos que permitió a un sector de la empresa organizar un sistema de mejora continua para bajar los índices de accidentes.

Establecimos un diagnóstico inicial del sector de una organización, y generamos una serie de recomendaciones, en términos de líneas de acción, para desarrollar posteriormente un proceso de mejora.

Para el siguiente desarrollo se tomaron como análisis, empresas de la Región. La metodología para el diseño de nuestro modelo, se tomó como base conceptual el ciclo de mejora de Deming: "Modelo para la mejora continua" y de cuya adaptación al aprendizaje en la empresa, surge el modelo de Dixon.

INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo, es llegar a desarrollar la participación de los trabajadores en la seguridad y la salud en el trabajo, alcanzando un nuevo instrumento de apoyo a la detección de necesidades formativas en el ámbito laboral, en PyMES de la región de La Plata, Berisso y Ensenada, en Servicios de Mantenimiento y Limpiezas

Químicas e Hidrocinéticas, de Equipos y Plantas de Proceso y Generación de Energía, Mantenimiento Civil, Mantenimiento Metalúrgico y Trabajos en Paradas programadas de Plantas.

Objetivos Generales: Desarrollar un proceso de capacitación y entrenamiento sobre diagnóstico y corrección de problemas crónicos que permita a un sector de la empresa organizar un sistema de mejora continua para bajar los índices de accidentes.

Objetivos Específicos: Establecer un diagnóstico inicial del sector de una organización, y generar una serie de recomendaciones, en términos de líneas de acción, para desarrollar un proceso de mejora.

- Capacitar a todo el personal involucrado en un sector de la PyME,
  - Administrativos
  - Operarios
  - Profesionales

En el uso de metodologías sistemáticas para diagnóstico y resolución de problemas crónicos y la detección de oportunidades de mejora.
Aplicar dichas metodologías a la resolución concreta de un problema crónico seleccionado, midiendo cuantitativamente los resultados alcanzados.
Durante muchos años hemos estado descuidando el más valioso de los recursos que una empresa puede tener, su capital humano.
Los empleados y operarios de todo tipo han sido contratados, entrenados y puestos a trabajar con consignas rígidas y una expectativa basada sólo en el movimiento y la obediencia. Toda la experiencia acumulada en la tarea asignada y la generada en tareas o posiciones anteriores sirvió de muy poco, ya que el uso del intelecto para desafiar las metas y paradigmas instalados no estaba dentro de las funciones asignadas.
Por otro lado, generamos esquemas competitivos, basados en la “perfomance” individual que, en lugar de cooperar en la obtención de resultados, generó tremendos desgastes originados en “luchas” entre individuos y sectores que siempre pensaban que estaban haciendo “lo debido” para obtener metas parciales.
El enfoque prevaleciente en la conducción y motivación de los operarios en occidente desde comienzos del siglo está basado en las ideas de Frederick Taylor, de acuerdo a la “Administración Científica”. De acuerdo a este enfoque, el operario está considerado solamente como una extensión de la máquina. Las mejoras en la productividad se logran al mejorar la tecnología y los métodos según la visión de los especialistas. Los directivos o dueños de las empresas toman las decisiones significativas y las transfieren a los niveles de los supervisores, para ser así pasadas a los operarios. Estos no tienen que pensar, sino ejecutar estrictamente las órdenes recibidas.
A partir del año 1948 se inicia en Japón un proceso que modificaría el mundo de la calidad y los negocios principalmente. Este proceso, inspirado por pensadores norteamericanos (W. E. Deming y J. Juran), deriva en el año 1962 en la formación de los primeros círculos de calidad, predecesores de los actuales equipos de mejora continua.
Para Caffyn y Bessant (1996), “Mejora continua es un proceso, en toda la empresa, enfocado en la innovación incremental y continua”, y para Harry Boer (2000), “La mejora continua es un proceso planificado, organizado y sistemático de cambios incrementales y continuos en las prácticas existentes en toda la organización, con el propósito de mejorar su rendimiento”.
En 1980, más de quinientas empresas de Estados Unidos de Norteamérica estaban ya usando equipos de mejora continua, principalmente en el ´área de calidad. En la actualidad no existe prácticamente ninguna empresa importante que no tenga un sistema de equipos de mejora, utilizando diversas variaciones de la misma metodología básica.

No existe colisión entre mejora continua, reingeniería, seis sigma o innovación. La mejora continua puede ser establecida como una innovación incremental o, muchas veces los resultados son asombrosos y espectaculares como los procesos de reingeniería.
El concepto básico de la mejora continua es entendible como un método de resolución de problemas, aplicado en forma permanente por equipos de trabajo multidisciplinarios, que utilizan una metodología sistemática para realizar los análisis y diagnósticos.
De acuerdo a la experiencia, los principales obstáculos a enfrentar en los procesos de mejora continua enfocados a las capacitaciones de seguridad industrial, serían los siguientes:

- **a)** El compromiso y las señales que la cumbre estratégica y las gerencias de línea media dan a toda la organización en general y a los equipos de mejora en particular.
- **b)** La falta de disciplina metodológica para atacar los problemas crónicos con la mente abierta y una alta cuota de creatividad a la hora de vencer paradigmas y encontrar nuevas soluciones.
- **c)** La falta de una estructura operativa que genere y mantenga viva la dinámica del proceso de mejora.
- **d)** La falta de un proceso efectivo de entrenamiento que permita aplicaciones inmediatas y fijación definitiva de los conceptos básicos.
- **e)** La creencia de que los grupos de mejora deben integrarse solamente o preferentemente con personal del núcleo operativo.
- **f)** La mala selección de los líderes o su ausencia en las mejoras.
- **g)** La falta de trabajo en equipo.

Estos obstáculos se potencian en general, en el ámbito de las PyMES, como resultado de la falta de información específica sobre los procesos de mejora. En la región es minoritario el número de empresas PyMES que hayan movilizado recursos internos y desarrollados procesos de delegación y trabajo en equipo con un concepto de mejora continua. Se observa también, que aquellas empresas con fuerte capacidad estratégica y elevado posicionamiento competitivo en la región, son las de mayor capacidad innovativa. Las actividades propuestas de mejora continua se consideran, como previamente se explicó, como innovaciones. De esta observación se concluye que existe una oportunidad extraordinaria de avanzar sobre procesos de mejora, en nuestro caso sobre capacitaciones en seguridad industrial, con el fin de eliminar o reducir problemas crónicos y llevar una estrategia participativa que fomente el involucramiento de todo el personal en la obtención de los objetivos fijados.

PARTE EXPERIMENTAL Y DISCUSION

Para el siguiente desarrollo se tomará como análisis a una empresa PyMES, de acuerdo a las características planteadas en los objetivos del trabajo. La Metodología a realizar en el desarrollo del trabajo, para el diseño de nuestro modelo, se tomará como base conceptual el ciclo de mejora de Deming (1993), “Modelo para la mejora continua” también conocido como ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act) y de cuya adaptación al aprendizaje en la empresa, surge el modelo de Dixon (1994), que puede interpretarse como muestra la siguiente tabla:

Fase	Interpretación
1 Generar	Hacer “visible” la información dentro de la empresa. Que sea conocida por quienes pueden tomar decisiones.
2 Integrar	Que dicha información se “despliegue” tanto como sea posible dentro de la empresa.
3 Interpretar	Que se comprenda el sentido y consecuentemente se faciliten los medios para las aplicaciones.

4 Actuar	Que se desarrollen las acciones necesarias para aplicar la información y los conocimientos adquiridos.

Se plantea a los participantes a capacitar una secuencia predeterminada de herramientas básicas para avanzar desde la definición del problema hasta su efectiva resolución.

1) Selección del tema y del grupo:

En este punto el jefe o supervisor del área, o en su defecto el propio grupo de participantes por él designado, define el tema de trabajo en función de prioridades y competencias de los miembros del equipo, en nuestro caso se tratará de bajar el índice de accidentes en un sector predeterminado de la organización.

2) Situación inicial y establecimiento de metas:

Se iniciará el trabajo determinando la situación inicial. El grupo debe saber en este sentido que el proyecto de capacitación debe estar adecuadamente acotado, claramente definido y asociado a uno o más indicadores que permita medir la evolución del mismo. El concepto básico aplicado aquí es que la mejora debe siempre medirse. La definición de la situación inicial no debe, en cambio, incluir ningún tipo de consideración sobre las posibles causas del problema y mucho menos sobre sus soluciones. Con esto se intenta minimizar la participación de los preconceptos y paradigmas establecidos en el análisis de causas que debe realizarse. El método descripto indica que los grupos deben contestar en esta etapa las siguientes preguntas: ¿Cuál es el problema?, ¿Cómo se mide?, ¿Dónde se observa?, y ¿Cuándo aparece?. Estas preguntas sirven para acotar la situación bajo estudio e identificar los indicadores asociados. En nuestro caso el problema es la disminución de accidentes, se mide muy simple contando los siniestros del resumen de la aseguradora y también de los accidentes no reportados en la misma, que involucran igual un costo extra a la organización.

3 Diagrama de Flujo del proceso:

Se establecerá con esta herramienta un diagrama que marque los límites del campo de estudio a capacitar y especifique las características, actividades y equipos que componen el proceso real. Se realizarán en este punto diagramas de flujos.

4) Torbellino de ideas:

Se generará con esta técnica un listado completo de las hipótesis de causa del problema a analizar. Es una de las técnicas más populares de creatividad para trabajo en equipo. Su popularidad se debe a que se trata de una práctica que apelando a un mecanismo que libera el potencial creativo, es de sencilla aplicación y brinda resultados extraordinarios a la hora de generar ideas y alternativas respecto de un tema específico.

5) Diagrama de causa y efecto: (Ishikawa)

Se discutirán y validarán las hipótesis de causa, construyendo luego un diagrama que permita visualizar las interconexiones entre los factores causales que nos lleven a la determinación de la causa raíz. Es una herramienta que permite ordenar y secuenciar las causas de un problema en forma gráfica. Clasifica las mismas en familias o categorías y subcategorías. Se compone de un esquema que se asemeja al esqueleto de un pez, por lo que se lo conoce también como “espina de pescado”. Deberemos revisar y discutir el listado de causas potenciales surgidas del paso anterior a los efectos de determinar la validez de cada causa y, a su vez, clasificarlas en familias, según la naturaleza de las mismas. En la cabeza de pescado se ubicará el problema a ser tratado, en nuestro caso los accidentes del área determinada, seguidamente se dibujarán las

ramas o familias principales de causas establecidas, el grupo tendrá total libertad para definir el tipo y cantidad de familias que integrarán el diagrama, teniendo esto una lógica relación con las características del listado previamente elaborado, en nuestro caso el área seleccionada de la organización, los operarios, administrativos y profesionales. El siguiente paso, será ubicar las posibles causas en las respectivas ramas o familias en las que habían sido previamente clasificadas. Para cada causa colocada en el diagrama, deberá realizarse la pregunta "¿Por qué?", todas las veces que sea necesario y posible, a los efectos de establecer las verdaderas raíces del problema, las cuales serán tratadas más adelante en la o las capacitaciones asociadas al mismo. Cuando no obtenemos más respuestas a la pregunta "¿Por qué?", habremos alcanzado las causas raíz, y estaremos listos para el próximo paso.

6) Ponderación de causas:

Si no es posible medir objetivamente la participación de cada causa en la conformación de la situación inicial, se establecerá un mecanismo subjetivo que apela a la experiencia de los miembros del grupo, del ingeniero laboral o quién éste haya asignado por su competencia, para asociar a cada causa con un valor numérico que establezca su grado de importancia, es decir el o los temas a tratar en la capacitación. Para ejecutar este paso se definirán primero una serie de criterios de evaluación de las causas, a los cuales se les da un peso en función de su relación con los objetivos del grupo y luego se califica a cada causa según su relación con cada criterio. Finalmente, la sumatoria de los productos de calificación por peso establece la ponderación para cada causa analizada. La experiencia muestra que este mecanismo indica con razonable precisión el orden (en cuanto a grado de importancia), de las causas raíz surgida del paso anterior.

Se deberá definir un criterio de evaluación principal que este fuertemente relacionado con el objetivo del problema. En nuestro caso, el objetivo es *"reducir los accidentes en el sector predeterminado"*, el criterio sería ***"generación de accidentes",*** es decir quienes aportan y en qué medida o peso a los accidentes producidos en el sector, cada causa así se calificará en función de su mayor o menor aporte a la generación de accidentes. También definimos uno o más criterios secundarios. Estos criterios tendrán relación con objetivos deseables, que de ser alcanzados enriquecerían el resultado final, pero que de ninguna manera es imprescindible lograr.

7) Diagrama de Pareto[1] de las causas raíz:

Con el resultado de la ponderación se construirá un diagrama de Pareto de causas. Si se ha utilizado un método subjetivo de ponderación, es posible que el diagrama resultante no verifique la relación 80% - 20% indicada en el principio de Pareto. Sin embargo, podemos utilizar el diagrama resultante para mostrar el diagnóstico del problema y justificar un plan de acción que aborde como mínimo el 20% de las causas con mayor ponderación. La aplicación de esta regla a las relaciones de causas y efectos, nos dice que unas pocas causas (aproximadamente el 20%) son responsables de la mayoría de los efectos (aproximadamente el 80%). Según esta apreciación, corroborada en miles de casos, es fundamental para hacer una buena utilización de recursos, establecer cuáles de nuestras causas raíces forman parte del 20% más importante. De esta manera comenzaremos primero a desarrollar las capacitaciones para ellas, asegurándonos así un impacto máximo sobre los resultados.

8) Plan de acción

Se establecerá un plan de capacitación que ataque las causas en el orden anteriormente establecido, fijando para cada acción:

- responsabilidad,
- fecha de cumplimiento y
- recursos asociados.

Se solicitarán en este punto las aprobaciones que resulten necesarias a los directivos del sector.

De acuerdo al grupo formado y al tema elegido, existen numerosas técnicas centradas en la participación y dinámica del grupo de aprendizaje.

9) Implementación:

Se realizará la capacitación en sí, de acuerdo a los grupos, temas y técnicas observadas en los puntos precedentes. Esta etapa puede ser muy simple o extremadamente compleja, dependiendo de la naturaleza de las acciones definidas y de la cantidad de recursos que deban ser puestos en juego.

Se hará un seguimiento cercano de la aplicación del plan ajustando el mismo permanentemente según la necesidad. Un paso importante es la de mantener registros de las capacitaciones realizadas y los resultados obtenidos.

10) Evaluación de resultados:

Se controlarán los indicadores identificados cuando se definió la situación inicial, y si la capacitación implementada resolvió el problema y más aún, si el objetivo propuesto fue alcanzado, y en qué medida.

11) Estandarización:

Se realizará una presentación final a los encargados del sector determinado o responsable designado por éste, y se generarán los mecanismos de estandarización necesarios para mantener los resultados alcanzados.

Conclusión:

En el presente trabajo, desarrollamos un nuevo instrumento para la detección de necesidades en el área de la seguridad e higiene en el ámbito laboral, encontramos esta posibilidad en sistemas de mejoras continuas, implementamos cursos de capacitaciones en tres PyMES de nuestra región, y logramos romper con la apatía generalizada en estas organizaciones cuando se exponen los problemas de higiene y seguridad tradicionales.

Bibliografía:

- Formento, Héctor y otros (2007): Equipos de Mejora Continua, Tomo 1 – Reglas para trabajo en equipos y resoluciones de problemas, Argentina, Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Formento, Héctor y otros (2008): Equipos de Mejora Continua, Tomo 2 – Conceptos básicos y metodología para la mejora de procesos, Argentina, Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Formento, Héctor y otros (2007): El proceso de mejora continua en PyMES argentinas – Investigaciones y modelos posibles, Argentina, Universidad Nacional de General Sarmiento.

- Spiegel, Alejandro (2010) – 3era reimpresión: Planificando Clases Interesantes, Argentina, Ediciones Novedades Educativas.
- Formento, Héctor y otros (2003): Desarrollo de una Metodología de Diagnóstico para Empresas PyMES Industriales y de Servicios – Enfoque Basado en los Sistemas de Administración para la Calidad Total, Argentina, Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Rezzónico, Ricardo Carlos (2008): Organizaciones seguras y responsables, Argentina, Ediciones del Autor.
- Manual de Higiene Industrial, cuarta edición (1996), Ediciones MAPFRE S.A.
- Levin, Richard I. y Otros (2004), Estadística para administración y economía, México, séptima edición (2004), Ediciones Pearson-Educación.
- Lagarde, Alfredo Rojas y Otros (2006): Fundamentos de la probabilidad y la estadística, Argentina, Editorial Universitaria de la UTN.
- Lagarde, Alfredo Rojas y Otros (2009): Elementos de probabilidad y estadística, Argentina, Editorial Universitaria de la UTN.
- Cleri, Carlos (2007): El libro de las Pymes, Argentina, Ediciones Granica.
- Montero Martínez, Ricardo; Siete principios de la seguridad basadas en los comportamientos, 2003,

http://www.seccionTecTextCompl1.pdf [Consulta: 31 de julio de 2013]

- Botta, Néstor Adolfo; Aumentan un 8,8% los accidentes mortales en el trabajo, 2013, http://www.rrhhdigital.com [Consulta: 28 de mayo de 2014]
- Organización Internacional del Trabajo – OIT; Comparación internacional de sistemas de salud y seguridad social, 2011, http://www.oit.org.ar [Consulta: 25 de febrero de 2014]
- Bour, Juan Luis y Otros de la Superintendencia de Riesgo del Trabajo – SRT, con Aval Institucional de la Fundación de Investigaciones Económicas Latinoamericanas, 2012, http://www.srt.gob.ar [Consulta: 4 de marzo de 2014]
- Participación de los trabajadores en la seguridad y la salud en el trabajo – Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el trabajo (EU-OSHA), Una Guía Práctica, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, http://www.etuc.org [Consulta: 11 de febrero de 2015].
- Participación de los trabajadores en la seguridad y la salud en el trabajo – Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el trabajo (EU-OSHA), Listas de comprobación de la participación efectiva de los trabajadores, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, http://www.etuc.org [Consulta: 5 de marzo de 2015].

LA CADENA DE VALOR DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: ENERGÍA EÓLICA EN BAHÍA BLANCA

Pendón Manuela, Williams Eduardo, Cibeira Natalia, Couselo Romina

UIDET FyEP Formulación y Evaluación de Proyectos
manuela.pendon@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe las principales etapas de la cadena de valor de las energías renovables, con un enfoque en su desarrollo en la provincia de Buenos Aires y, en particular, en el caso de la energía eólica en Bahía Blanca. Se analizan aspectos clave como la identificación de sitios con recursos óptimos, el desarrollo de proyectos, la producción e instalación de tecnología, y la participación de industrias locales en la fabricación de componentes y equipos. Asimismo, se examina el estado actual de los parques eólicos en funcionamiento. Además, se estudia el impacto socioeconómico del sector, con énfasis en la generación de empleo en áreas vinculadas y los desafíos y oportunidades que presenta la expansión de la energía eólica. Como conclusión, a partir del estudio de caso, se reafirma la importancia de fortalecer la cadena de valor de las energías renovables en la provincia de Buenos Aires. En este sentido, se destaca la necesidad de impulsar políticas públicas, fomentar el acceso a financiamiento y promover una mayor articulación entre los sectores público y privado para consolidar el crecimiento del sector.

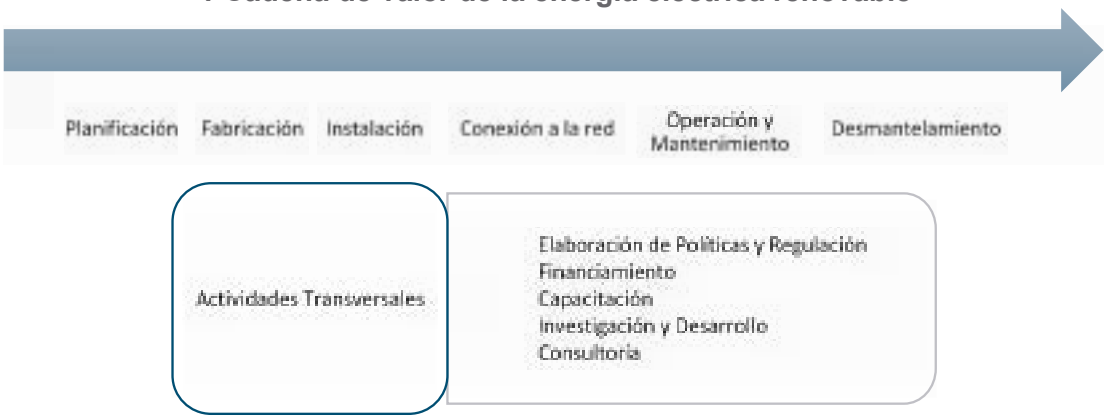
CADENA DE VALOR DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

La cadena de valor de las energías renovables puede estructurarse en seis eslabones principales, complementados por actividades transversales. Como se observa en el Gráfico 1, estos eslabones incluyen:

Planificación: Se generan valor y oportunidades a través de estudios de factibilidad, evaluación de recursos y diseño de proyectos, donde la participación de especialistas es fundamental.
Fabricación: Desde el abastecimiento de materias primas hasta la producción y montaje de componentes clave. En el caso de la energía eólica, se destacan la fabricación de palas de rotor, torres y góndolas, donde la madurez de industrias locales, como la siderúrgica, puede ser un factor clave para el desarrollo de la producción nacional.
Instalación: Actividad intensiva en mano de obra que involucra ingeniería civil, obras de infraestructura y montaje. Si bien la instalación suele ser realizada por empresas locales, en algunos casos, los fabricantes de equipos importados asumen parte de este proceso.
Conexión a la red: Incluye la integración de la energía generada a la infraestructura eléctrica, lo que requiere inversiones en redes de transmisión y distribución. La mejora de la infraestructura contribuye no solo a la integración de energías renovables, sino también a la confiabilidad del sistema eléctrico.
Operación y mantenimiento: Etapa clave para garantizar la eficiencia a largo plazo de los proyectos. Involucra monitoreo, inspección de equipos y servicios de reparación, generando empleo sostenido en el tiempo.
Desmantelamiento: Al final de su vida útil, los proyectos requieren procesos de reciclaje y disposición final de los componentes, una actividad que cobrará mayor importancia en los próximos años.
Entre las actividades transversales destacan la elaboración de políticas y regulaciones, financiamiento, capacitación, investigación y desarrollo, y servicios de consultoría. El potencial de creación de valor varía según el grado de desarrollo del sector en cada región. En países donde la industria es incipiente, las oportunidades de crecimiento se encuentran principalmente en la operación y mantenimiento, así como en la integración a la red. A medida

que la industria local madura, surgen mayores oportunidades en la fabricación de tecnología y en áreas como la investigación y el desarrollo.

1 Cadena de valor de la energía eléctrica renovable



Fuente: Elaboración propia.

ENERGÍA EÓLICA EN BAHÍA BLANCA

Caracterización

Del total de la potencia instalada de renovables del país en el 2021, el 66% fue de energía eólica. En la PBA, el total de la potencia instalada de energía eólica fue de 1,18 GW, el 97,2% de la potencia instalada de renovables en la PBA disponible conectada a la red. Los únicos proyectos de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables en la PBA que se encuentran comercialmente habilitados por CAMMESA (1) son eólicos y de biogás/biomasa. La capacidad instalada eólica en la PBA demuestra que, dentro de las renovables, es la más desarrollada tanto por su bagaje histórico como por la disponibilidad del recurso en el sur de la misma. En cuanto a la disponibilidad del recurso eólico se cuenta con el Sistema de Información Geográfico Eólico Nacional (SIG Eólico), el mapa de información geográfica desarrollado por la Subsecretaría de Planeamiento Energético y con Global Wind Atlas (GWA 2.0) que fue lanzado a fines de 2017, desarrollado por el Banco Mundial y la Universidad Técnica de Dinamarca para ayudar a gobiernos e inversores a identificar áreas prometedoras para la generación de energía eólica. A su vez, se generó el Mapa eólico GBA en el marco del PROINGED. En el año 2011, el Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE-UTN) comenzó a realizar un estudio sobre la medición del recurso eólico con fines energéticos en la provincia para poder caracterizar los posibles sitios de emplazamiento de parques eólicos, siendo fundamental la calidad y certidumbre para viabilizar los proyectos. En el 70% del territorio nacional hay disponibles vientos medios superiores a 5 m/s que son factibles para el uso para generación eléctrica distribuida. El sur de la PBA posee vientos medios superiores a 9 m/s, posicionándose como un área geográfica estratégica debido a la sinergia territorial entre recurso eólico, infraestructura energética, trayectoria, capital humano y estímulos estatales, que abre nuevas posibilidades para convertir su potencial eólico en un nuevo eje de desarrollo para la región (2) Desde el punto de vista de integración a la red, a medida que ha aumentado el despliegue de la energía eólica, también lo han hecho las preocupaciones sobre la integración de esa energía en los sistemas eléctricos. La naturaleza y magnitud del desafío de la integración depende del sistema y varía de acuerdo al grado de penetración. Estos desafíos tal como se ha mencionado, en el caso de energía solar fotovoltaica, no son exclusivos de la energía eólica. Añadir cualquier tipo de tecnología de generación a un sistema eléctrico, particularmente la generación variable con restricciones de ubicación, presenta desafíos. La experiencia indica que, a niveles bajos o medios (20%) de penetración de la electricidad eólica no plantea problemas técnicos insuperables (3) Los problemas de integración incluyen desde cómo abordar la incertidumbre y variabilidad del recurso hasta la posible necesidad de capacidad de transmisión para permitir que las plantas de energía eólica ubicadas en lugares lejanos satisfagan las necesidades de los centros de demanda. Dado

que la energía eólica se caracteriza por ser intermitente y depende de cada lugar y momento, para su crecimiento existe la necesidad de seguir investigando y desarrollando la implementación de distintos sistemas de almacenamiento para poder regular la oferta y la demanda. Las formas de almacenamiento pueden ser baterías, pilas de combustible de hidrógeno, almacenamiento térmico, aire comprimido, condensadores y supercondensadores, y bombeo hidroeléctrico. El hidrógeno renovable es una de las grandes promesas para el almacenamiento y la reutilización de la energía y a la vez puede utilizarse la energía eólica para producir el propio hidrógeno para ser almacenado, transportado y utilizado nuevamente para producir energía. De esta forma se puede disponer de la energía lejos del lugar donde se genera de una forma completamente sustentable (4) La energía eólica es una fuente de energía inagotable que durante su proceso de generación no produce gases tóxicos ni residuos sólidos. Es compatible con otras actividades tales como la agricultura y la ganadería, no daña los suelos y puede emplazarse en zonas áridas o no cultivables. En algunos casos los impactos negativos se relacionan con sonidos y vibraciones, campos electromagnéticos y modificaciones a la flora y la fauna, pero que en el balance general se compensan y exceden con los beneficios. A pesar de que la inversión inicial es mayor que la requerida para la producción de combustible fósil, estos equipos tienen bajos costos de mantenimiento y tienen una vida útil de entre 20 y 30 años. Además, en las fases de desarrollo, construcción, operación y mantenimiento de los proyectos, se requiere de recursos humanos directos que generan ingresos en las comunidades del lugar. Por ejemplo, en el país, si se considera sólo la fabricación local de torres y el ensamblaje, se generan 2.300 empleos por cada 1.000 MW de potencia(5)

Actores del Sistema Científico y Tecnológico

Desde principios del año 2000, en la PBA se vienen incorporando a las carreras académicas de grado y de posgrado materias donde se evalúa el aprovechamiento eólico de la región. En los últimos 10 años, se multiplicaron los seminarios de posgrado en energías renovables y el desarrollo de congresos, jornadas y charlas abiertas a la comunidad, organizadas tanto por universidades locales, el Instituto Argentino de Energía (IDE) como por asociaciones civiles como la Cámara Eólica Argentina (CAE), la Cámara Argentina de Renovables (CADER) y la Asociación Argentina de Energía Eólica (AAEE), entre otras. Dentro de los proyectos de investigación que se están llevando a cabo en la provincia, se destacan los que refieren a los sistemas eólicos de baja potencia dado que poseen una amplia potencialidad por las capacidades científico-tecnológicas locales y por su idoneidad para proveer soluciones energéticas adaptadas a necesidades situadas (2). Este tipo de desarrollos, junto con el Programa de Certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia facilitado por el INTI, alientan al crecimiento y la correcta implementación de este tipo de aerogeneradores. El Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE-UTN) es uno de los principales actores que desde el año 2009 viene estudiando las aplicaciones de la energía eólica y ofreciendo servicios de caracterización del recurso, evaluación de sitios de emplazamiento para el aprovechamiento energético, estudios de factibilidad de instalación de sistemas de suministro de energía eléctrica a través del recurso eólico tanto para sistemas aislados como conectado a la red. Además, ofrece servicios de análisis estadísticos, capacitaciones y mantenimiento predictivo. Trabajaron también en el diseño de un prototipo de aerogenerador de pequeña escala con mínimo ruido y máximo rendimiento orientado tanto a zonas Urbanas como Rurales y en el diseño Integral de un Aerogenerador Eléctrico con Materiales Compuestos Vitreos de Nanopartículas para la conducción magnética, entre otros desarrollos. Por otro lado, el Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP-UTN) localizado en Bahía Blanca realizó el diseño de un dispositivo electromecánico autónomo para el monitoreo inalámbrico de variables mecánicas en álabes de aerogeneradores, utilizando el principio de inducción y recolectando energía proveniente de la vibración de palas de aerogeneradores. Actualmente, se encuentra desarrollando el diseño de micro aerogeneradores híbridos de eje vertical (VAWT) para aplicaciones urbanas. El mismo pretende aprovechar la energía eléctrica obtenida del aerogenerador para energizar dispositivos electrónicos urbanos. Se busca un buen rendimiento en condiciones de viento variable en dirección y velocidad, autoarranque a

velocidad no mayor a 10 km/h y un diseño compacto. En conjunto con INVAP Ingeniería y la FRN de Neuquén, el grupo GIMAP se encuentra desarrollando un prototipo de dispositivo autónomo (independiente de pilas o batería para su alimentación) destinado al sensado estructural del aerogenerador.
En el Gráfico 2 se resumen los Actores del Sistema Científico y Tecnológico de Energía Renovable Eólica relevados en la PBA, con particular foco en aquellos sitios en Bahía Blanca.

2 Actores del Sistema Científico y Tecnológico Energía Renovable Eólica PBA

Etapa de la Cadena a la que aporta - Actividad a la que se vincula	Actor	Ubicación	Productos	Características
Fabricación Investigación y Desarrollo	Instituto de Industria - (IDEI - UNGS)	Los Polvorines	Estrategias para el desarrollo de equipamiento	Estrategias para el Desarrollo de la Trama Productiva de Equipamiento Eólico y Solar .
Fabricación Diseño y fabricación de componentes	Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE-UTN)	Bahia Blanca	Prototipo Aerogenerador de pequeña escala	Diseño de Aerogenerador de Pequeñas Potencias con Mínimo Ruido y Máximo Rendimiento para Uso en Zona Urbana y Rural
Fabricación Diseño y fabricación de componentes	Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP-UTN)	Bahia Blanca	Diseño y modelación de micro-aerogeneradores híbridos para aplicaciones urbanas	Diseño de micro aerogeneradores híbridos de eje vertical (VAWT) para aplicaciones urbanas. Se pretende aprovechar la energía eléctrica obtenida del aerogenerador para energizar dispositivos electrónicos urbanos.
Fabricación Diseño y fabricación de componentes	Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE-UTN)	Bahia Blanca	Diseño Integral de un Aerogenerador Electrico con Materiales Compuestos Vitreos de Nanoparticulas	Incorporar un material vitreo sobre nuevos materiales nanocristalizadospara la conducción magnética.
Fabricación Diseño y fabricación de componentes	Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP-UTN)	Bahia Blanca	Diseño de Recolectores de Energía para el Sensado Autónomo en Generadores Eólicos	Diseño y fabricación de Aerogeneradores de Eje Vertical de Pequeña Escala que se utilizan para iluminación, diseñados para Argentina en función de las características específicas del viento. Hacerlos más baratos, más eficientes y con mejores materiales. Se realiza una simulación computacional de como el viento llega al generador y cuánta energía se saca realmente modificando el ángulo de ataque de los álabes. Está pensado para ambientes urbanos, ya que no generan ruido ni contaminación de ningún tipo.
Fabricación Modelado y Pruebas	Grupo Fluidodinámica Computacional (UIDET GFC - UNLP)- INVAP - Cutral Co - ITP Argentina S.A.	La Plata	Desarrollo de Palas para Generadores Eólicos	Desarrollo Nacional de Palas para Generadores Eólicos
Fabricación Modelado y Pruebas	Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LACLyFA - UNLP)	La Plata	Banco de pruebas túnel de viento	Estudio de eficiencia (respuesta en turbulencia) de aerogeneradores. Banco de pruebas.
Fabricación Modelado y Pruebas	Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP-UTN)	Bahia Blanca	Prototipo mecánico recolector de energía	Desarrollo de un dispositivo electromecánico autónomo para el monitoreo inalámbrico de variables mecánicas en álabes de aerogeneradores.El dispositivo utilizará el principio de inducción y operará recolectando energía proveniente de la vibración de palas de aerogeneradores.
Fabricación Certificación	Organismo de certificación del INTI	Buenos Aires	Certificación	Programa de certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia
Operación y Mantenimiento Mantenimiento	Grupo de Estudio Sobre Energía (GESE-UTN)	Bahia Blanca	Mantenimiento predictivo	Mantenimiento predictivo: diagnóstico de fallas en las máquinas eléctricas

Fuente: Elaboración propia.

Ecosistema Productivo en la PBA

En los proyectos de energía eólica en funcionamiento y conectados a la red de energía eléctrica, que se detallan en el Gráfico 3, durante el año 2021 se disponibilizaron 1.177 MW en la PBA, la mayoría de ellos se encuentran emplazados en Bahía Blanca y ciudades aledañas. En el marco del PROINGED, en la localidad de Darregueira, se llevó adelante la reparación y puesta en funcionamiento de un Aerogenerador de 750 kWp instalado en el año 1997. Este proyecto eólico refuerza los datos y mediciones que indican el gran potencial que tiene la PBA en materia de generación eólica. En el año 2012 se creó a través de la Cámara de Industriales de Proyectos e Ingeniería de Bienes de Capital de la República Argentina (CIPIBIC) el Clúster Eólico Argentino (6), que agrupa 72 empresas argentinas cuyo objetivo principal es el de garantizar la máxima integración nacional posible en cada uno de los proyectos eólicos que se construyan en Argentina. De esta manera, buscan colaborar con el Poder Ejecutivo en el desarrollo de políticas energéticas, lograr la sustitución de

importaciones, fomentar el intercambio de experiencias empresariales y profesionales, incrementar la competitividad de las empresas del sector y favorecer la cooperación entre los miembros del Clúster para trabajar conjuntamente en diferentes proyectos eólicos. Actualmente en la PBA se reúnen 39 empresas nacionales, que fabrican todos los elementos necesarios para el desarrollo de la energía eólica y/o construir parques eólicos nacionales (6)

3 Parques Eólicos conectados a la red en PBA

Generadora	Potencia instalada MW	Ciudad	Partido	Empresa Desarrolladora
P.EOLICO VILLALONGA II	3	Villalonga	Patagones	Genneia
P.EOLICO CORTI	100	Bahia Blanca	Bahia Blanca	Pampa Energía
P.EOLICO GARCIA DEL RIO	10	Garcia del Rio	Tornquist	Sowitec - Alemania
P.EOLICO LA CASTELLANA	101	Villarino	Villarino	Eoliasur
P.EOLICO LA CASTELLANA 2	15	Mayor Buratovich	Villarino	Eoliasur
P.EOLICO LA ENERGETICA MATER	20	Tres Picos	Tornquist	Aes Corp - EEUU
P.EOLICO LA ENERGETICA Renov2	80	Tres Picos	Tornquist	Aes Corp - EEUU
P.EOLICO LA GENOVEVA I REN2	88	Bahia Blanca	Bahia Blanca	Eoliasur
P.EOLICO LA GENOVEVA II MATER	42	Bahia Blanca	Bahia Blanca	Eoliasur
P.EOLICO LOS TEROS - MATER	123	Azul	Azul	YPF Luz
P.EOLICO LOS TEROS II	52	Azul	Azul	YPF Luz
P.EOLICO MATACO 3 PICOS	203	Tres Picos	Tornquist	PCR Energy
P.EOLICO MIRAMAR - RENOVAR 1.5	99	Miramar	Miramar	Xinjiang Goldwind Science and Technology Co
P.EOLICO PAMPA ENERGIA	101	Coronel Rosales	Coronel Rosales	Pampa Energía
P.EOLICO VIENTOS DE NECOCHEA	38	Necochea	Necochea	Genneia
P.EOLICO VIENTOS DEL SECANO	50	Mayor Buratovich	Villarino	PCR Energy
P.EOLICO VILLALONGA	52	Villalonga	Patagones	Genneia
SEA ENERGY PARQUE EOLICO	0,25	Necochea	Necochea	Sea Energy

Fuente: Elaboración propia a partir de (CAMMESA, 2022).

En los últimos años, se ha desarrollado en Argentina una amplia red de proveedores y empresas para adquirir, instalar y mantener aerogeneradores eólicos de baja potencia (7). (Un total de 18 empresas fabricantes, principalmente pequeñas y medianas, ofrecen 54 modelos de turbinas en un rango de potencia de 150 W a 10.000 W. El 40 % de estos fabricantes es capaz de producir hasta 10 aerogeneradores por mes. La PBA reúne el 50 % de la capacidad de producción (2)

Oportunidades de Desarrollo y Escalado

La fabricación de aerogeneradores requiere habilidades técnicas similares a las empleadas en la producción de maquinaria mecánica y electromecánica pesada. Entre las áreas clave involucradas se encuentran la fundición y acabado de piezas, la fabricación de componentes metálicos y electromecánicos, el montaje de sistemas eléctricos, y la producción e instalación de sistemas de control. Además, la logística y el transporte desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de la energía eólica.

En la provincia de Buenos Aires (PBA), la industria local ha demostrado una sólida capacidad de producción, con un alto grado de contenido nacional en la fabricación de aerogeneradores terrestres. Actualmente, se producen localmente componentes clave como torres, góndolas, generadores, palas, electrónica de potencia y carenados. No obstante, una excepción notable son los imanes permanentes, fundamentales para ciertos tipos de generadores, que dependen de tierras raras y cuya producción está dominada por China.

La capacidad productiva local se refleja en la existencia de dos marcas de aerogeneradores homologados y certificados que ya están inyectando energía a la red. Un ejemplo es el Aerogenerador NRGP 82 de 1,5 MW Clase II, instalado en el Parque Eólico Cerro de la Gloria, operado por la Cooperativa Eléctrica de Castelli en la PBA.

Dado el avance en la producción local y la experiencia adquirida, surgen diversas oportunidades de innovación y expansión. Una de ellas es el desarrollo de aerogeneradores de eje vertical, que presentan niveles de ruido reducidos y menor impacto visual, lo que facilita su integración en entornos urbanos y residenciales. Estos dispositivos podrían incorporarse en mamposterías de edificios y viviendas, ampliando las posibilidades de generación distribuida. Asimismo, se identifican oportunidades en la modularización y personalización de aerogeneradores de pequeña escala, mediante diseños adaptables, variedad de colores y la fabricación in situ. Estas innovaciones permitirían una mayor facilidad de transporte e instalación, promoviendo su adopción en generación descentralizada. Además, el uso de nuevos materiales y resinas en la fabricación de palas podría mejorar su eficiencia y durabilidad. Por otro lado, el desarrollo de soluciones de almacenamiento energético, como baterías de ion-litio o hidrógeno renovable, potenciará el crecimiento de la energía eólica, especialmente en aplicaciones a pequeña escala. Esto incluye su uso en generadores de emergencia como alternativa a los actuales sistemas a gasoil, fortaleciendo la autonomía energética en caso de interrupciones del suministro eléctrico. Un desafío clave sigue siendo la gestión de la variabilidad del recurso eólico para su integración eficiente en la red eléctrica. En este sentido, el desarrollo de software de simulación y predicción representa un área con alto potencial de agregación de valor local, optimizando la planificación y operación de los parques eólicos. En cuanto a la formación de capital humano, la instalación y mantenimiento de parques eólicos demandan habilidades especializadas en mecanizado, soldadura, diseño, ingeniería, gestión y trabajos en altura. Sin embargo, en el segmento de pequeña escala, aún no se han identificado programas de formación específicos en la PBA para instaladores de aerogeneradores de baja potencia. Una iniciativa destacada en este sentido es el programa del INTI para la certificación de operarios profesionales en instalación de aerogeneradores de baja potencia, lo que contribuirá a cerrar esta brecha y fortalecer el sector. En conclusión, la combinación de capacidades industriales locales, avances en almacenamiento y digitalización, y la expansión de oportunidades en generación distribuida posicionan a la energía eólica como un sector con gran potencial de desarrollo y escalado en la provincia de Buenos Aires.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la energía eólica en la provincia de Buenos Aires, y particularmente en Bahía Blanca, ha consolidado a la región como un polo estratégico para las energías renovables en Argentina. La abundancia de recursos eólicos, combinada con una infraestructura energética en expansión y un ecosistema industrial en crecimiento, ha permitido la instalación y operación de múltiples parques eólicos, impulsando la generación de empleo y el desarrollo tecnológico local. Sin embargo, persisten desafíos clave para fortalecer la cadena de valor del sector. La falta de financiamiento accesible, la necesidad de marcos regulatorios más estables y predecibles, y la dependencia de la importación de ciertos componentes limitan la consolidación de una industria local competitiva. En este sentido, es fundamental el diseño de políticas públicas que incentiven la inversión, promuevan el desarrollo de proveedores nacionales y faciliten la integración de la energía eólica en la matriz eléctrica con infraestructura de transmisión adecuada. Además, la creciente penetración de energías renovables plantea la necesidad de soluciones innovadoras para gestionar la variabilidad del recurso. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento, como baterías y producción de hidrógeno verde, se presenta como una alternativa clave para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

En conclusión, el potencial de la energía eólica en Buenos Aires es innegable, pero su consolidación como un sector estratégico depende de una planificación a largo plazo que fomente la industrialización local, la investigación y la cooperación entre el sector público y privado. Un enfoque integral permitirá no solo aprovechar al máximo los recursos renovables de la región, sino también fortalecer la soberanía energética y contribuir a la transición hacia un sistema energético más sustentable y resiliente.

BIBLIOGRAFÍA

1.CAMMESA. (1 de octubre de 2022). Obtenido de https://cammesaweb.cammesa.com/

2.Clementi, L., & Jacinto, G. (2021). Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en Argentina. Buenos Aires.

3.IRENA(2014).https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Socioeconomic_benefits_solar_wind.pdf. The Socio-economic Benefits of Solar and Wind Energy.

4. Cámara Eólica Argentina. (noviembre de 2022). La Actualidad del Sector Eólico de Argentina en Noticias CEA. Obtenido de https://www.noticiascea.com/post/c%C3%B3mo-funciona-un-parque-e%C3%B3lico-y-c%C3%B3mo-se-distribuye-la-energ%C3%ADa-en-la-red

5. René Vaca Guzmán. (24 de Febrero de 2022). El impacto socioeconómico de la energía eólica. Ámbito, pág. 1.

6 Cluster Eólico Argentino. (noviembre de 2022). Cluster Eólico Argentino. Obtenido de https://clustereolico.com.ar/objetivos-2/

7 Ramírez, O. J. (2018). Fabricantes de equipos de generación eólica de baja potencia. Oportunidades generadas por la nueva legislación. n VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Tucumán.

PRÁCTICAS EXPERIMENTALES DE METROLOGÍA EN LA ENSEÑANZA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. UNA APROXIMACIÓN A LA ENSEÑANZA POR COMPETENCIAS

Autores: Esp. Ing. Tittonel, Marcelo; Esp. Ing. Gabriel Crespi; Ing. Alfredo Escalona Barrionuevo; Ing. Ángel Joaquín Martínez

Lugar de trabajo: Instituto Malvinas, diag. 80 nro. 372 Cátedras Producción II y III, mtittonel@ing.unlp.edu.ar.

Introducción:

El presente trabajo tiene por objeto presentar una experiencia de aplicación, en el marco de la docencia universitaria, de las técnicas, conceptos y experiencias prácticas desarrolladas, que formaron parte de innovaciones en el dictado de la asignatura Producción II y Producción III, de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de ingeniería de la UNLP.

Analizados los planes de estudio disponibles en las páginas web de las universidades, en las distintas unidades académicas, se observan asignaturas que abordan la temática de ingeniería de la calidad, o sistemas de gestión de calidad y mejora continua, en todas ellas.

Dentro de los lineamientos establecidos para la enseñanza universitaria y en particular para las ingenierías encuentran un marco conceptual en las publicaciones realizadas por el Consejo nacional de Decanos de Ingeniería, donde se expresa la necesidad de la práctica experimental que, en palabras del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería CONFEDI:

> *“Hay consenso en cuanto que el ingeniero no sólo debe saber, sino también saber hacer. El saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos, sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, etc. que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje, para que la propuesta pedagógica incluya las actividades que permitan su desarrollo”.*

Resulta evidente la importancia de medir, para el desarrollo de las competencias y en la actividad Profesional futura, y consecuentemente la necesidad de incorporar y/o fortalecer los conocimientos teóricos y prácticos de metrología en la carrera de ingeniería en general e ingeniería Industrial en lo particular

> *“Hay consenso en cuanto que el ingeniero no sólo debe saber, sino también saber hacer. El saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos, sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, etc. que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje, para que la propuesta pedagógica incluya las actividades que permitan su desarrollo”.*

Si en particular se hace foco en la enseñanza de Ingeniería Industrial, dentro de las competencias específicas publicadas también por el CONFEDI, en su "PROPUESTA DE ESTÁNDARES DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA LA ACREDITACIÓN DE CARRERAS DE INGENIERÍA EN LA REPÚBLICA ARGENTINA (LIBRO ROJO DE CONFEDI)", se señala que:

> "El *Ingeniero Industrial debe gestionar y certificar el funcionamiento, condiciones de uso, calidad y mejora continua de las operaciones, procesos e instalaciones requeridas para la producción, distribución y comercialización de productos (bienes y servicios).*

Puede desprenderse de lo anterior que tanto para gestionar como para certificar o mejorar los bienes y servicios de las operaciones gestionadas se requerirá realizar mediciones. Para fundamentar lo anterior, es oportuno citar las expresiones de Lord Kelvin en cuanto a que:

> *"Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre".*
>
> *"Cuando usted. puede medir aquello de lo que está hablando, y expresarlo en números, usted sabe algo de ello, pero cuando usted no puede expresarlo en números, su conocimiento es pobre e insatisfactorio"*

Se puede concluir que, resulta evidente la importancia de medir para el desarrollo de las competencias y en la actividad Profesional futura, y consecuentemente la necesidad de incorporar y/o fortalecer los conocimientos teóricos y prácticos de la metrología en la carrera de ingeniería en general e ingeniería Industrial en lo particular.

La combinación de la experiencia experimental en la determinación o confirmación de algún proceso de diseño, modelización, investigación etc, con la práctica de las mediciones a los efectos de probar, evaluar y optimizar los mismos formar parte de la práctica de la ingeniería y por ende apropiados en la formación de los estudiantes.

> *…"**Toma de decisiones basada en la evidencia,** Las decisiones basadas en el análisis y la evaluación de datos e información tienen mayor probabilidad de producir los resultados deseados"…*[1]

Si bien la referencia de los principios de la gestión de la calidad, de la Norma ISO 9000:2015, respecto de los datos e información, no provienen únicamente de instrumentos de medida, éstos serán seguramente la fuente de información fundamental, cuando así corresponda.

En el mismo sentido la norma más adelante señala como acciones posibles las siguientes:

> *…" Las acciones posibles incluyen:*
>
> *• determinar, **medir** y hacer el seguimiento de los indicadores clave para demostrar el desempeño de la organización;*
>
> *• poner a disposición de las personas pertinentes todos los datos necesarios;*

[1] Principios de la gestión de la calidad, Norma ISO 9000:2015

> ***• asegurarse de que los datos y la información son suficientemente precisos, y seguros;***
>
> *• analizar y evaluar los datos y la información utilizando métodos adecuados;*
>
> ***• asegurarse de que las personas son competentes para analizar y evaluar los datos según sea necesario;***
>
> *• tomar decisiones y tomar acciones basadas en la evidencia, equilibrando la experiencia y la Intuición" …*[5]

En el desarrollo de las actividades enseñanza aprendizaje, especialmente en el ciclo superior el docente se encuentra con el desafío de mantener el interés del alumnado, durante el dictado de las clases.

La clase denominada magistral, donde el docente realiza la exposición oral y el alumno recibe la información, si bien no necesariamente por sí misma es buena o mala, lo cierto es que no puede ser el único recurso, para retener el interés del alumnado.

La mayoría de los alumnos que cursan sus estudios en la facultad de ingeniería de la UNLP, son nacidos en la era de la tecnología de comunicación (TIC´s), a esta generación de la denomina generación Z o iGeneration, nacidos a mediados de los ´90 generación principios del siglo XXI, crecieron con auge de la tecnología e internet, no conocen un mundo sin tecnología y dispositivos conectados a internet, pueden describirse como …"personas menos sociables, extremadamente interactivas, multifuncionales, menos concentradas y no son expertos en jerarquías laborales. Esta generación es también llamada "generación desafiante" debido a las dificultades que las personas enfrentarán para ingresar al mercado laboral (Geck, 2006)"…[2], en función de esta caracterización es que se inició un proceso de innovación pedagógica, respecto de la modalidad tradicional.

Parte experimental:

Un aporte clave para la incorporación de variantes en el dictado de la asignatura fue la adopción de la modalidad de los denominados "juegos serios". Esta estrategia didáctica permite experimentar conceptos expuesto en clases teóricas tradicionales y logran despertar mayor interés y reflexionar sobre la información y/o conocimientos recibidos, "Los juegos serios son juegos que tienen una finalidad educativa, de entrenamiento o de información y están cuidadosamente pensados para tal fin (Michael D., 2006). Si bien no están destinados a ser jugados como entretenimiento, esto no significa que no deban ser entretenidos, agradables o divertidos…. la finalidad es la formación y educación, el entrenamiento de habilidades específicas, la comprensión de procesos complejos"….[3]

Un ejemplo de ello es el caso de la experiencia del laboratorio de curva de aprendizaje, donde los alumnos ejecutan una tarea de recrear una construcción con bloques de madera siguiendo, un modelo impreso que indica su disposición, haciendo las veces de plano de construcción, repitiendo la experiencia sucesivas veces y tomando en cada repetición el tiempo insumido en la tarea. Obteniéndose así una serie de tiempos que van decayendo con

[2] Suamit Correia, y Daniel Fernando. (2017). Desafíos y dificultades en la enseñanza de la ingeniería a la generación Z: Un caso de estudio. Recuperado de ttps://revistas.usil.edu.pe/index.php/pyr/article/view/163

[3] Juegos Serios y Educación, Javier Díaz, Claudia Queiruga, Laura Fava, LINTI-Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas. Facultad de Informática. Universidad Nacional de La Plata

las repeticiones y mediante el uso de una planilla de cálculo preparada con anterioridad por el docente, se encuentra la expresión de la ley de decaimiento empírica que se define como curva de aprendizaje obteniéndose de la misma mediante calculo la tasa de aprendizaje.



Ilustración 1: practica experimental de curva de aprendizaje

La buena recepción por parte de los alumnos de este tipo de práctica alentó la implementación de otras experiencias desarrolladas por el INTI en el Área de tecnologías de gestión, mediante la adquisición de un KIT de herramientas didácticas, desarrolladas en conjunto con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) poniendo en prácticas conceptos como nivelación de líneas de producción, como también la metodología KANBAN.



Ilustración 2 Práctica experimental de KANBAN

El resultado de estas actividades, fue una innovación en el dictado de algunos temas logrando cambiar el eje poniendo al alumno en el centro del proceso de enseñanza aprendizaje, mediante un participación activa y el docente dirigiendo el proceso de construcción del conocimiento del grupo, ampliando el concepto podemos decir que …"la metodología participativa se fundamenta en los procesos de intercambio (de conocimientos, experiencias, vivencias, sentimientos, etc.), de resolución colaborativa de problemas y de construcción colectiva de conocimientos que se propician entre los sujetos que componen el grupo."…[4]

Una de las técnicas aprendidas durante el desarrollo de la Especialización en calidad industrial, en la que varios de los autores del presente trabajo se formaron, fue la de

[4] Monescillo, M. (2002). Metodologías participativas y nuevas tecnologías en la formación de formadores. Málaga: FACEP

visualización, moderación y presentación[5]. Dicha técnica puede combinarse perfectamente con la actividad en las clases participativas.

Esta técnica fue desarrollada para implementar en ámbitos laborales, ya que propician una mejor comunicación y participación de los grupos de trabajo, y que en hasta en algunos casos la única forma de lograr consensos. Esta técnica permite, asimismo, desarrollar en forma transversal las denominadas **Competencias sociales, políticas y actitudinales**, definidas también en el libro rojo del CONFEDI, y se enumeran más abajo

6. Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.

7. Comunicarse con efectividad.

9. Aprender en forma continua y autónoma.



Ilustración 3: actividad de visualización moderación presentación

Finalmente se desarrollo una actividad de laboratorio donde se combinó el uso de distintos instrumentos (balanzas, termómetros, picnómetros, tablas, etc) con el objeto de determinar el peso especifico de un material sólido (material de referencia), para finalmente comparar el valor del certificado del material de referencia con el obtenido por determinación de laboratorio, trabajando el concepto de incertidumbre de la medición, alrededor del valor obtenido.



Ilustración 4 Practica de laboratorio de medición

[5] DGQ I – QMS - Gestión de la Calidad Enfocada en Procesos I – Fundamentos – Parte 2. Capítulo 9 – Visualización, moderación, presentación.

Resultados y discusión:

Luego de la implementación de las distintas experiencias se realizaron encuestas para relevar la opinión de los alumnos y sus experiencias, luego del desarrollo de las practicas experimentales o laboratorios.

Para la recolección de datos acerca de los resultados de las experiencias se utilizó la herramienta gratuita de Google form, entre las distintas cohortes que participaron de las prácticas.

Luego de la implementación de las distintas experiencias se realizaron encuestas para relevar la opinión de los alumnos y sus experiencias. A la pregunta de si le ayudó la experiencia experimental a entender el concepto trabajado el 100 % (77 encuestados) respondieron que sí y el 85 % calificó con 7 o más la experiencia como metodología de enseñanza. Finalmente, el 95 % concluyó que debiera haber más experiencias experimentales en la carrera.

Conclusiones:

A partir de las respuestas obtenidas puede identificarse un impacto positivo en cuanto a la implementación de prácticas experimentales en el desarrollo de la asignatura, logrando no solo una variedad de estrategias pedagógicas, sino también una mayor receptividad por parte de los alumnos, un mayor aprovechamiento del espacio de enseñanza – aprendizaje y una instancia de intercambio donde el docente puede trasladar su experiencia en el campo de la industria.

Bibliografía:

1 Ruiz-Meza, J., & Vergara, C. (2018). Historia de la Ingeniería Industrial. Enfoques, Teorías y Perspectivas de la Ingeniería Industrial y sus Programas Académicos (pp. 1-24). CECAR.

2 Manual Curso de entrenamiento “Quality management I- Fundamental”. Deutsche Gesellschaft für Qualität (DGQ). (2017).

3 Instituto de Ingenieros Industriales y de sistemas, recuperado de https://www.iise.org/Home/

4 Joaquín Valdés (2021), Apuntes de clase de Metrología General.

5 Principios de la gestión de la calidad, Norma ISO 9000:2015

6 Suamit Correia, y Daniel Fernando. (2017). Desafíos y dificultades en la enseñanza de la ingeniería a la generación Z: Un caso de estudio. Recuperado de ttps://revistas.usil.edu.pe/index.php/pyr/article/view/163

7 Juegos Serios y Educación, Javier Díaz, Claudia Queiruga, Laura Fava, LINTI-Laboratorio de Investigación en Nuevas Tecnologías Informáticas. Facultad de Informática. Universidad Nacional de La Plata.

8 Monescillo, M. (2002). Metodologías participativas y nuevas tecnologías en la formación de formadores. Málaga: FACEP

9 DGQ I – QMS - Gestión de la Calidad Enfocada en Procesos I – Fundamentos – Parte 2. Capítulo 9 – Visualización, moderación, presentación.

SÍNTESIS DE MATERIALES BIOBASADOS DE QUERATINA Y LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO COMO ADSORBENTES EN DERRAMES DE PETRÓLEO

Orjuela-Palacio J.M.[1]; Zaritzky, N.[1,2]

[1]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos (CIDCA), Fac. de Cs. Exactas, UNLP-CICPBA-CONICET, La Plata, Argentina. [2]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. juliana.orjuela@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

La generación de grandes volúmenes de biomasa residual de plumas por parte de la industria avícola representa un problema ambiental significativo. Los métodos convencionales de manejo y disposición, como el quemado y el enterramiento, no solo son costosos y demandan grandes espacios, sino que también generan contaminación, afectando los ecosistemas y las poblaciones cercanas. Sin embargo, esta biomasa constituye una fuente accesible y económica de queratina, una proteína caracterizada por su alto contenido de enlaces disulfuro, lo que la hace insoluble en solventes polares. La queratina puede emplearse en la fabricación de materiales bioadsorbentes mediante procesos de bajo costo y ambientalmente sostenibles. Esta proteína puede disponerse en forma de hidrogel, formando una red tridimensional similar a una esponja, compuesta por cadenas poliméricas con poros interconectados. Las esponjas son estructuras porosas con propiedades mecánicas, morfológicas específicas. La queratina ha despertado gran interés en la producción de esponjas debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad, resistencia mecánica y abundancia en la naturaleza [1].

Diversas actividades industriales generan efluentes con alto contenido oleoso, incluyendo aceites, grasas, crudo y sus derivados. Los derrames de estos compuestos en suelos y cuerpos de agua provocan una contaminación ambiental severa, con impactos negativos en los ecosistemas y las comunidades. El crudo y sus derivados son difíciles de remover y pueden persistir en el medioambiente si no se aplican técnicas de remediación adecuadas. Aunque existen métodos físicos y químicos para la remoción de estos contaminantes, su aplicación es limitada debido a su alto costo, baja eficiencia de sorción y posible generación de residuos secundarios [2]. Esto ha impulsado el interés en métodos alternativos basados en materiales biodegradables y de bajo costo, capaces de eliminar contaminantes de manera eficiente y sostenible. Los materiales sorbentes poseen la capacidad de remover compuestos tóxicos a través de procesos de adsorción y/o absorción, ofreciendo una alternativa ambientalmente amigable, económica y eficaz. El uso de biopolímeros ha ganado relevancia en las últimas décadas. Los materiales basados en queratina presentan una notable capacidad de sorción de contaminantes, incluyendo crudo y aceites, mediante una combinación de mecanismos físicos y químicos. A nivel físico, el crudo se retiene en los poros y en la superficie del material, mientras que, a nivel químico, interactúa con los grupos funcionales de la queratina [3]. La eficiencia de sorción de crudo en los biopolímeros depende de diversos factores, como la densidad, porosidad y morfología superficial del material, así como de la presencia de grupos funcionales y aminoácidos que modulan sus propiedades de sorción [3].

Los objetivos del presente trabajo son: a)Extraer queratina de residuos de pluma utilizando métodos que eviten la diálisis que es costosa a nivel industrial; b) Sintetizar esponjas de queratina; c) Realizar la caracterización fisicoquímica y microestructural de las esponjas mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC),análisis termo-gravimétrico (TGA) espectroscopía infrarroja (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM); d) Determinar y modelar las isotermas de sorción de vapor de agua de las esponjas; e) Analizar la capacidad de las esponjas sintetizadas para captar crudo y determinar las cinéticas correspondientes.

Palabras clave: Biomas de Plumas, Queratina, L-cisteína, Cinética de sorción, crudo.

2. Materiales y Métodos

2.1 Síntesis de esponjas de queratina: En primer lugar, se llevó a cabo la extracción de queratina . Para ello se utilizó la capacidad reductora del aminoácido L-cisteína ($HS\text{-}CH_2\text{-}CHNH_2\text{-}COOH$), que puede sustituir a los reactivos tóxicos utilizados en la extracción del biopolímero y la acción como agente desnaturalizante de la urea, que puede romper los enlaces de hidrógeno presentes en la proteína y exponer los enlaces S-S. Las plumas previamente acondicionadas [4] se mezclaron en relación 1:20 (m/v) con soluciones que contenían Urea (NH_2CONH_2) [2-8M] y el aminoácido L-cisteína [0,165M] a pH 10.5, calentando a 60 °C durante 3 h con agitación constante. Se procedió con la precipitación y lavado de la queratina. Se ajustó el pH a 4,2 y se realizaron 5 ciclos de lavados y filtrados del precipitado. Para obtener las esponjas de queratina, la proteína obtenida se centrifugó a 3000 rpm por 10 min, se congeló a -40 ºC y se liofilizó en un equipo BIOBASE BK-FD10S (Shandong, China).

2.2 Caracterización fisicoquímica

Propiedades térmicas: Se evaluaron las propiedades térmicas de las esponjas mediante calorimetría diferencial de barrido con un equipo DSC Q100 (TA Instruments, USA); la velocidad de calentamiento aplicada fue 10 ºC/min y la rampa de 0 a 300 ºC.

Se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) realizado en un equipo Thermo Plus EVO2 (Japón); la velocidad de calentamiento fue 10 ºC/min hasta 700 ºC.

Caracterización de la microestructura y morfología: Los espectros infrarrojos de transformada de Fourier (FTIR) con reflectancia total atenuada (ATR) se obtuvieron con un espectrómetro Nicolet IS10 (Thermo Fisher Scientific Inc., Rockford, USA) con accesorio de ATR (diamante). Se trabajó en un rango de números de onda desde 4000 a 400 cm^{-1}. Se colectaron 60 barridos con una resolución de 4 cm^{-1}. Los datos obtenidos se procesaron utilizando el software OMNIC TM de Thermo ScientificTM.

La caracterización morfológica de las esponjas fue analizada por mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un microscopio FEI modelo Quanta 200.

Propiedades de sorción de vapor de agua: Se determinó la isoterma de sorción de vapor de agua para la esponja a 20°C y en un rango de a_w= 0,11-0,96; se analizaron diferentes modelos no lineales (Tabla 1) y se comparó la bondad del ajuste a los datos experimentales. Los parámetros se estimaron mediante regresión no lineal de los datos experimentales con los programas Origin Pro-v 8.0 (OriginLab Corp.USA).

Tabla 1. Ecuaciones y parámetros correspondientes a los modelos no lineales.

Modelo	Ecuación	Variables
GAB	$W_c = \frac{W_m . K . C . a_w}{(1 - K a_w).[1 - K . a_w + C . K . a_w]}$ Ec.1	Wm: humedad del material que corresponde a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua. C: constante de GAB, característica del material y relacionada al calor de adsorción de la monocapa. K: factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.
OSWIN	$\boldsymbol{W_c = A\left[\frac{a_w}{(1-a_w)}\right]^B}$ Ec. 2	A y B: constantes del modelo, características del material.
HALSEY	$\boldsymbol{W_c = \left[\frac{A}{ln(1/a_w)}\right]^{\frac{1}{B}}}$ Ec. 3	A y B: constantes del modelo, características para cada material.

La selección del modelo más apropiado se basó en su bondad de ajuste, evaluada mediante el porcentaje de error medio relativo (%E): $\%E = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|Wc_i - Wc_{pi}|}{Wc_i}$ **Ec. 4,** dónde "n" es el número de datos experimentales, W_{ci} y W_{cp} los valores de humedad experimentales y predichos respectivamente.

2.3 Aplicación ambiental: Capacidades como bioadsorbente de crudo

Se determinó la capacidad de sorción crudo mediante el protocolo propuesto por Zhou [5] con modificaciones. Se cortaron fragmentos cilíndricos de las esponjas que sumergieron en 10 mL crudo (ρ= 0,885 g/ mL). Después de 5 minutos de sorción, se retiró y drenó por 30 s hasta que no quedaran gotas residuales sobre la superficie. La capacidad de sorción de crudo (C.S.C) fue calculada a partir de la siguiente ecuación: $\boldsymbol{C.S.C} = \left(\boldsymbol{g}/\boldsymbol{g}\right) = \frac{(W_s - W_o)}{W_o}$ **Ec. 5,** donde, W_s es el peso del material sorbente después de la sorción (g) y W_o es el peso inicial de la esponja (g). Después de la sorción por 5 minutos, la esponja mojada fue drenada 30 s y luego centrifugada a 500 rpm; se registró el peso final la esponja (W_f). La capacidad de retención de crudo (C.R.C) se calculó mediante la ecuación: $\boldsymbol{C.R.C} = \left(\boldsymbol{g}/\boldsymbol{g}\right) = \frac{W_f}{W_s} * \mathbf{100}$ **Ec. 6,** donde ***Ws*** es el peso del sorbente después de la sorción de aceite/crudo y ***Wf*** el peso restante de la esponja después de la centrifugación. Se realizó el ensayo por duplicado.

2.3.1 Estudios cinéticos

Con el objetivo de investigar los mecanismos de sorción, diferentes fragmentos del biosorbente se pusieron en contacto con a) Crudo: en crudo (20 mL) sin agitación y b) dispersión crudo/agua: en mezcla con agitación a 125 rpm. Para un rango de 0 a 180 min se fueron evaluando la C.S.C y C.R.C. Los modelos de 1er y 2do orden son ampliamente aplicados en la descripción de procesos de sorción, permite explicar los mecanismos que se presentan entre sistemas sólido/liquido.

Tabla 2. Modelos cinéticos aplicados en la descripción del proceso de sorción

Modelos	Ecuación	Variables
Pseudo 1er Orden	$q_t = q_e(1 - e^{-kt})$ Ec. 7	q_t es la cantidad de crudo sorbido (g/g) a tiempo t; q_e es la cantidad de crudo sorbido en el equilibrio; k_1 es la constante de velocidad (min^{-1}).
Pseudo 2do Orden	$q_t = k_2 {q_e}^2 t/(1 + k_2 q_e\, t)$ Ec. 8	k_2 es la constante de velocidad (min^{-1}).

3. Resultados

3.1 Propiedades térmicas: El material presentó gran estabilidad térmica (Fig 1.A; 217 °C y ΔH de 114,7 J/g). Se observa un pequeño pico endotérmico a temperatura mayor que la temperatura de desnaturalización; este se podría atribuir a un ΔH_d de la transición de las estructuras tipo α-hélice cristalinas [6]. Se identificó una transición endotérmica entre 50-100 °C relacionado con la evaporación del agua [6].

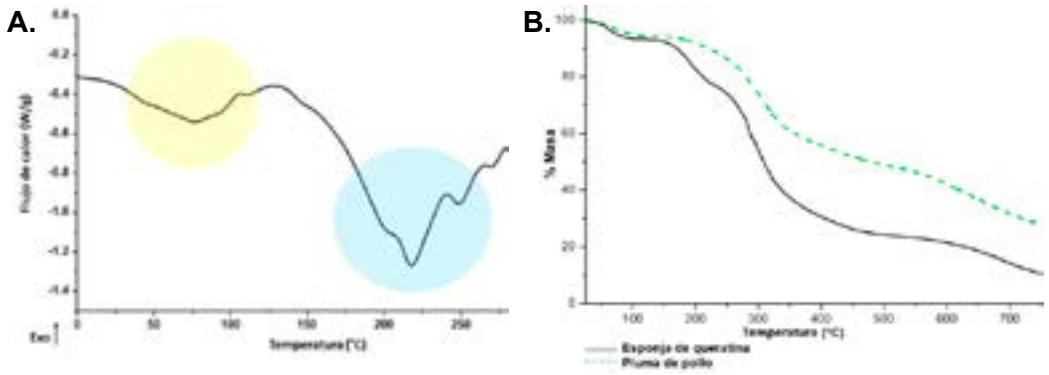


Figura 1.A. Termograma de calentamiento (DSC). **B.** Análisis termogravimétrico (TGA) para las plumas de pollo y las esponjas de queratina.

El análisis termogravimétrico (Fig. 1.B) indicó que la biomasa y el material biobasado presentan una tendencia similar en el proceso térmico de tres etapas, conservando la estabilidad térmica original. Se registró una baja pérdida de peso del 6,24 % antes de superar la temperatura de 100 °C (Etapa I), esto se puede atribuir a la evaporación de agua presente como agua libre [7]. En la Etapa II, la pérdida de peso que ocurre entre los 150 a 500 °C, representó una mayor pérdida porcentual de un 41,9 % para las plumas y un 69,4 % para el material biobasado del total del peso perdido. Los valores reportados II pueden ser asociados a la degradación de la estructura helicoidal de la queratina

3.2 Análisis de la microestructura y morfología: El espectro FTIR-ATR del (Fig. 2.A) evidencia la presencia de las bandas Amida I (1690-1600 cm^{-1}), Amida II (1575-1480 cm^{-1}) y la señal correspondiente a la oxidación de la cisteína (1200-1040 cm^{-1}), estos datos son consistentes con los reportados para plumas de pollo (Ma et al., 2016). En la evaluación de la deconvolución de la Amida I (Fig. 2.B) se detectaron los componentes correspondientes a la estructura α-hélice (1657-1651 cm^{-1}), hoja plegada-β (1631-1621 cm^{-1}) y de estructuras desordenadas (1697-1670 cm^{-1}), representando un 94,7/2,7/2,6%.

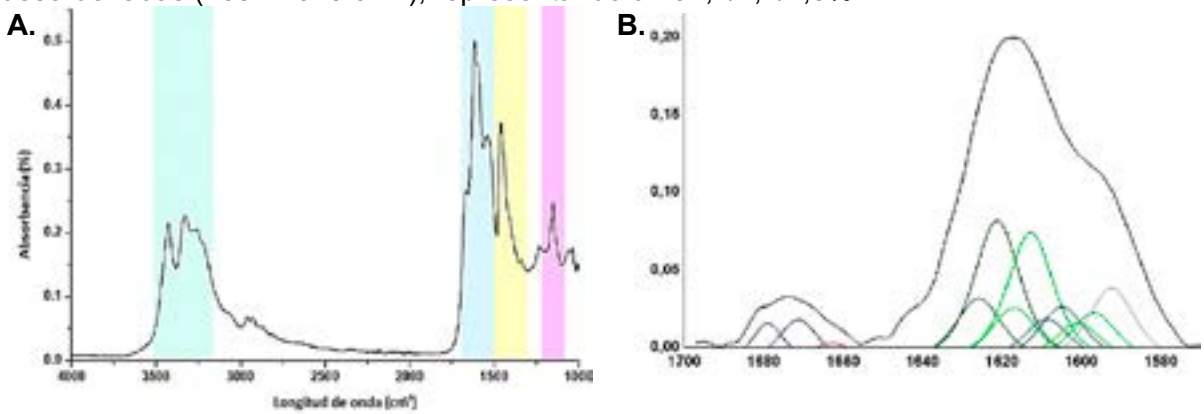


Figura 2.A Espectro FTIR-ATR. **B.** Banda Amida I y curvas gaussianas obtenidas mediante la deconvolución del espectro FTIR-ATR de la esponja de queratina.

Se analizó la morfología de la esponja de queratina mediante las micrografías SEM (Fig. 3). El material está conformado por una microestructura heterogénea porosa con una superficie rugosa. El análisis de la composición indica que la esponja tiene la siguiente composición elemental: C (55,6 %), O (21,9%), S (2,1 %), Cl (0,9 %), Na (0,24 %) y N (19,3 %). La presencia de cloro y sodio se asocia al proceso de ajuste de pH y precipitación.

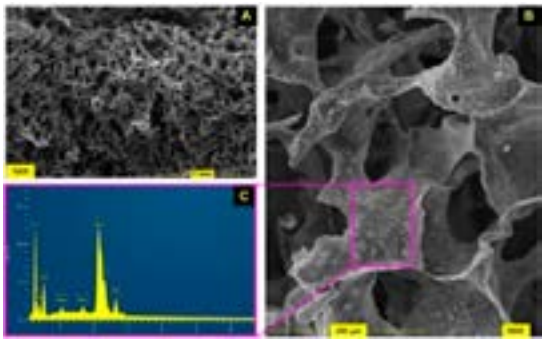


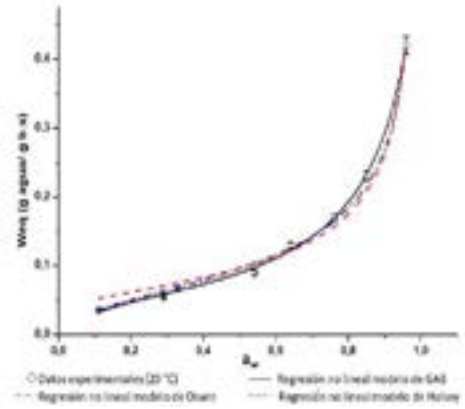
Figura 3. Micrografías SEM de la esponja de queratina, magnificación de 100X y 500X (A,B). C) Análisis de componentes.

3.3 Isotermas de sorción de vapor de agua: La isoterma de sorción del material conserva la característica típica sigmoidal de la queratina, indicando que el agua es sorbida en multicapas. El modelo de GAB mostró el mejor ajuste a los datos experimentales de contenido de agua de equilibrio y a_w. El W_m fue de 0,060 g de agua / g de esponja (b.s).

Tabla 3. Parámetros de regresión no lineal de las ecuaciones de GAB, Halsey y Oswin, parámetros estadísticos (R^2 y %E).

Modelo	Parámetro	Valor	error	R^2	%E
GAB	$W_{m(GAB)}$	0,06	0,003	0,99	3,861
	$C_{(GAB)}$	9,86	3,385		
	$K_{(GAB)}$	0,91	0,005		
HALSEY	$A_{(HALSEY)}$	0,01	0,002	0,94	11,69
	$B_{(HALSEY)}$	1,71	0,183		
OSWIN	$A_{(OSWIN)}$	0,10	0,004	0,99	5,98
	$B_{(OSWIN)}$	0,47	0,015		

Figura 4. regresiones no lineales de las ecuaciones de GAB, Oswin y Halsey.



Datos experimentales de sorción de vapor de agua (20°C, a_w= 0,11-0,96)

3.4 Aplicación ambiental: Capacidades como bioadsorbente de crudo

La capacidad de sorción medida a 5 minutos fue de 9,01±0,18 g de crudo/ g esponja (b.s) y una capacidad de retención de 74,4 %, valores superiores a los reportados para las plumas de pollo 6,1 g de crudo/ g de pluma [3].



3.4.1 Estudios cinéticos: En la figura 5 se presentan los datos experimentales de sorción para los dos casos de estudio y las regresiones de los modelos de primer y segundo orden; los resultados mostraron que el proceso de sorción de crudo fue más rápido en los primeros tiempos evaluados, disminuyendo a medida que se acercaba al equilibrio, que para ambos sistemas se alcanzó a los 15 minutos de sorción.

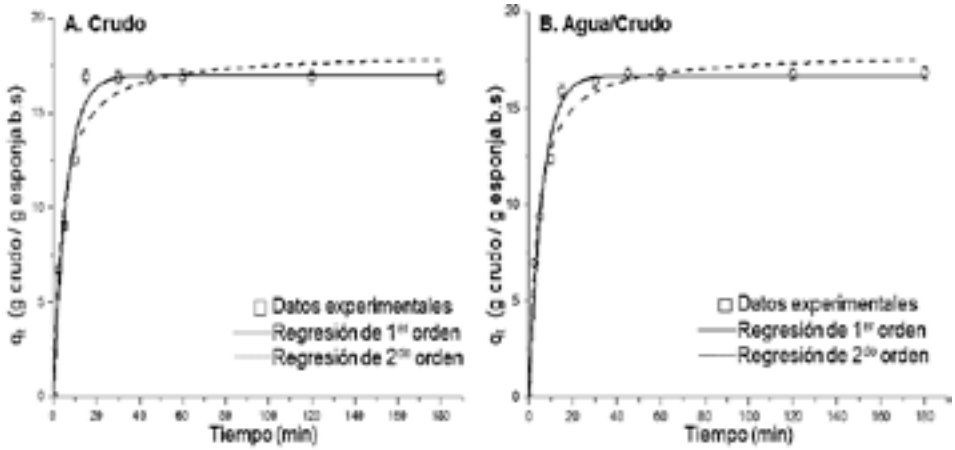


Figura 5. Cinéticas de sorción de crudo y regresiones de los modelos de primer y segundo orden para los casos: A) Crudo y B) Agua/crudo.

Este comportamiento se explica por la alta presencia de sitios disponibles para la sorción en el biosorbente al inicio haciendo que el proceso de sorción sea rápido. Otro factor que contribuye a la ralentización de la sorción es la posible repulsión entre moléculas cercanas de crudo. Al analizar los datos experimentales se identificó que los valores máximos de CSC y CRC fueron de 16,9 g crudo/ g esponja y 80,1 % para el sistema de crudo a un tiempo de 15 minutos. A ese mismo tiempo en el sistema b) agua/crudo los valores medidos fueron 15,9

g crudo/ g esponja y 79,9 %. El modelo de primer orden se ajustó mejor a los datos de sorción experimentales para ambos casos (Tabla 4); los valores de q_e y k_1 calculados con el modelo pseudo-primer orden para crudo (q_e= 16,99 g crudo/ g esponja; k_1= 0,164) y para la mezcla agua/crudo (q_e= 16,71 g crudo/ g esponja; k_1= 0,169) no presentan diferencias significativas ($p>0,05$); los tiempos estimados de equilibrio (t_{eq}) fueron 70 y 72 minutos, respectivamente. Kelle [2] reportaron que las plumas de pollo presentan una q_e de 13,10 g crudo/g pluma a los 60 minutos de sorción.

Tabla 4. Parámetros cinéticos para los modelos de primer y segundo orden aplicados al proceso de sorción de crudo por esponjas de queratina.

Modelo	Parámetros	Crudo	Agua/crudo
Pseudo-primer orden	q_e	16,969 (0,33)	16,71 (0,27)
$q_t = q_e(1 - e^{-kt})$	K_1	0,164 (0,014)	0,169 (0,013)
	R^2	0,982	0,987
Pseudo-segundo orden	q_e	18,17 (0,63)	17,90 (0,43)
$q_t = k_2 {q_e}^2 t/(1 + k_2 q_e t)$	k_2	0,014 (0,003)	0,0146 (0,002)
	R^2	0,973	0,964

Eficiencia de reutilización de las esponjas: Se determinó por la capacidad de sorción de crudo después de ciclos repetidos de sorción/retención en medio mixto agua/crudo. El material puede reutilizarse en la sorción de crudo por 5 ciclos sin perder su estructura ni capacidad de sorción y retención.

4. Conclusiones

Se obtuvieron esponjas de queratina a partir de plumas de pollo, residuo de la industria avícola, mediante una metodología de extracción con mezclas de L-cisteína/urea, sin diálisis, lo cual tiene grandes ventajas a nivel industrial. El material biobasado conservó los principales grupos funcionales de la proteína nativa y mostró un excelente desempeño como sorbente competitivo para la contención y manejo de derrames de crudo, representando una alternativa viable para la revalorización de esta biomasa. El estudio cinético de sorción reveló que, para la geometría y dimensiones evaluadas, el equilibrio del sistema se alcanzó en 15 minutos, estableciendo el tiempo de contacto mínimo. Las cinéticas fueron adecuadamente descritas por el modelo de pseudo-primer orden. Este método innovador constituye una alternativa ambientalmente sostenible para transformar residuos avícolas en un material funcional capaz de mitigar la contaminación por hidrocarburos.

5. Referencias

[1] Rouse, J. G., & Van Dyke, M. E. (2010). A review of keratin-based biomaterials for biomedical applications. Materials, 3(2), 999-1014. https://doi.org/10.3390/ma3020999

[2] Kelle, H. I., & Eboatu, A. N. (2018). Determination of the viability of chicken feather as oil spill clean-up sorbent for crude oil and its lower fractions. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 22(2), 267-273.

[3] Ifelebuegu, A. O., & Johnson, A. (2017). Nonconventional low-cost cellulose-and keratin-based biopolymeric sorbents for oil/water separation and spill cleanup: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 47(11), 964-1001.

[4] Orjuela Palacio, J.M; Zaritzky N.(2021) Evaluación de las condiciones del proceso de extracción de queratina mediante hidrolisis alcalina con hidróxido de sodio. 6° JITE FI-UNLP.

[5] Zhou, L. T., et al,. (2014). Preparation of regenerated keratin sponge from waste feathers by a simple method and its potential use for oil adsorption. Environmental Science and Pollution Research, 21(8), 5730-5736.

[6] Patrucco, et al,. (2016). Wool fibril sponges with perspective biomedical applications. Materials Science and Engineering: C, 61, 42-50.

[7] Martinez-Hernandez, A. L., & Velasco-Santos, C. (2012). Keratin Fibers from Chicken Feathers: Structure and Advances in Polymer Composites. In Renke Dullaart and João Mousquès (Ed.), Keratin: Structure, Properties and Applications (pp. 149–211).

TRANSFORMACIÓN SOSTENIBLE DE LA BIOMASA DE PLUMAS RESIDUO DE LA INDUSTRIA AVÍCOLA PARA LA OBTENCIÓN DE QUERATINA: COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN QUÍMICAS CON METODOLOGÍAS VERDES APLICANDO SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS (DES)

Orjuela-Palacio, Juliana M.[1], Zaritzky Noemí E. [1,2]

[1]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos- CIDCA (CONICET-UNLP-CIC), La Plata, CP: 1900, Argentina.
[2]Depto. de Ingeniería Química- Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, CP: 1900, Argentina.
juliana.orjuela@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

La valorización de residuos agroindustriales representa una estrategia fundamental para reducir el impacto ambiental asociado a la acumulación de subproductos no aprovechados. El sector avícola presenta una tendencia de crecimiento sostenida por el incremento del consumo de carne de aves a nivel mundial, dando como resultado grandes volúmenes de biomasa de plumas que por sus características de disposición final se convierten en un grave problema ambiental. Esta biomasa es una fuente abundante, disponible y económica de queratina, una proteína fibrosa estructural de alta resistencia, biodegradable y biocompatible que presenta un gran potencial de reutilización en aplicaciones industriales incluyendo cosméticas, farmacéuticas, ambientales, etc. Sin embargo, la revalorización eficiente de la queratina a partir de esta biomasa sigue siendo un desafío debido a su estabilidad química por conformarse de una red de enlaces disulfuro, interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno que le confieren una resistencia térmica alta y baja solubilidad en solventes polares convencionales. Tradicionalmente, para su obtención se aplican procesos de extracción poco sustentables y costosos, empleando agentes químicos tóxicos y contaminantes como 2-Mercaptoetanol y Ditiotreitol (DTT), y/o incluyendo etapas de purificación que pueden aumentar los costos del proceso. Sin embargo, estos enfoques presentan desventajas tales como la generación de subproductos contaminantes, baja selectividad y altos costos operativos. Lo anterior, ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes desde el punto de vista ambiental y económico. El diseño de procesos verdes de extracción como herramienta clave para la transformación sostenible de la biomasa son claves.

Los solventes eutécticos profundos (DES, por sus siglas en inglés) son una clase emergente de sistemas líquidos homogéneos que muestran propiedades únicas y versátiles en diversas aplicaciones, desde la síntesis química hasta la separación de sustancias y la extracción de compuestos bioactivos. A diferencia de los solventes convencionales, los DES están formados por la combinación de dos o más compuestos, que pueden ser sales, ácidos, alcoholes u otros componentes, en proporciones específicas que permiten la formación de un punto eutéctico, donde la mezcla exhibe un punto de fusión significativamente más bajo que el de sus componentes individuales [1,2]. En estas mezclas uno de los compuestos actúa como aceptor de enlace de hidrógeno (HBA, “hydrogen bond acceptor”) o donantes de enlace de hidrógeno (HBD, “hydrogen bond donor”) que se asocian, causando que el punto de congelación de la mezcla sea mucho menor comparado con cada uno de sus componentes individuales. Los DES son considerados solventes verdes, ya que muchos de los componentes utilizados son de origen natural y biodegradables, lo que los convierte en alternativas más sostenibles a los solventes orgánicos convencionales, muchos de los cuales son tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente. Entre los HBA más utilizados se encuentran las sales de cloruro de



Figura 1. Esquema de sustancias donantes o aceptores de enlace hidrógeno.

colina y compuestos cuaternarios de amonio, mientras que los HBD incluyen ácidos carboxílicos, amidas, polialcoholes y aminoácidos, como la L-cisteína que tiene la capacidad de reducir los enlaces disulfuro presentes en la queratina, facilitando su desnaturalización y solubilización en el medio eutéctico. En comparación, los DES basados en L-cisteína representan una alternativa verde y eficiente, permitiendo la disolución selectiva de la queratina con una menor afectación de su integridad estructural y funcional. Debido a su capacidad para disolver una amplia gama de compuestos, los DES se han utilizado en la extracción de productos naturales, la catálisis, la síntesis de materiales, y más recientemente, en la separación y recuperación de metales preciosos y la extracción de productos químicos. En los últimos años ha aumentado el interés por el uso de este tipo de solventes para la disolución de biomasas ricas en queratina como lana, pelo y plumas, principalmente debido a las características de interés del biopolímero como biocompatibilidad, biodegradabilidad, no toxicidad, fácil disponibilidad y bajo costo. a partir de biomasa. Estudios recientes han demostrado que ciertos DES basados en colina y urea, así como combinaciones con ácidos orgánicos, pueden disolver la queratina de manera efectiva, mejorando la eficiencia del proceso de extracción y reduciendo la generación de residuos nocivos [1,2,3].

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y comparar con otras técnicas, la eficiencia de las mezclas binarias basadas en L-cisteína como solventes eutécticos profundos (DES) en la extracción de queratina a partir de biomasa de plumas de pollo, con énfasis en la optimización de las condiciones del proceso y la caracterización del biopolímero recuperado, con el fin de generar procesos viables para la revalorización de residuos de la cadena de producción avícola.

Palabras Clave: Solventes eutécticos profundos, Plumas, Queratina, FTIR-ATR.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Adecuación de las plumas de pollo: Las plumas utilizadas son de pollos parrilleros líneas COBB y ROSS provistas por Domvil SA - Frigorífico Aveguay de Entre Ríos, Argentina. El proceso de adecuación se realizó según Orjuela & Zaritzky [5].

2.2 Disolución de biomasa en mezclas de solventes eutécticos profundos: En este trabajo, la biomasa de plumas fue procesada con mezclas de solventes DES basadas en L-cisteína. Se realizaron dos tipos de mezclas binarias DES: a) **K_DES_A**: L-cisteína/ácido Láctico en relación 1:15 [1]; b) **K_DES_B:** L-cisteína/Urea en relación molar 1:2.

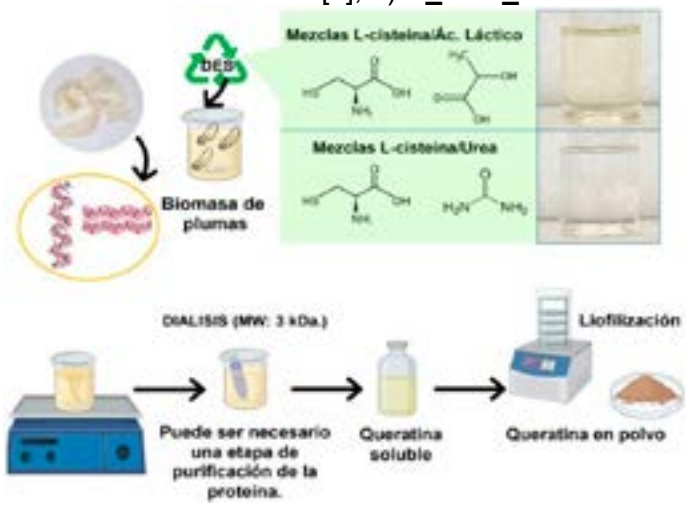


Figura 2. Esquema del proceso de extracción de queratina a partir de plumas de pollo, aplicando mezclas binarias DES basadas en L-cisteína.

Las mezclas se calentaron a 90 °C hasta obtener una solución DES homogénea y traslúcida [Gilmore et al. 2018]. A continuación, se adicionaron las plumas molidas y secas a las mezclas DES en relación de 1:10 m/v y se inició la reacción. Las condiciones de la etapa de extracción se variaron entre 3-12 h y la temperatura de 30-90 °C. Las dispersiones obtenidas se filtraron para retirar los restos de plumas sin disolver. Fue necesario incluir una etapa de diálisis para la obtención de la queratina. Las disoluciones se dializaron (Cutt off membrana: 3000 Da) durante 48 h con cambios de agua destilada. Se ajustó el pH a 4,2 y se centrifugó (3000 rpm, 10 min, 10°C). Los pellets se lavaron con abundante agua

destilada, se congelaron a -40ºC y liofilizaron en un equipo BIOBASE BK-FD10S (Shandong, China).
La metodología aplicada de mezclas binarias DES se comparó con las extracciones químicas que describen los procesos optimizados: a) reducción con sulfuro de sodio (Na_2S= 7,8 g/L, 60°C y 1 h) [6]. b) hidrólisis con hidróxido de sodio (NaOH= 5 %m/v, 60°C y 1 h) [5].

2.3 Caracterización de la queratina extraída
2.3.1 Rendimiento de solubilización: Se calculó el rendimiento de solubilización de las plumas de pollo para las diferentes condiciones de proceso evaluadas. El porcentaje de pluma solubilizada (Sol_{pluma}, *% p/p*) se calculó a través de la ecuación 1.

$$\mathrm{Sol_{pluma}}\ (\%) = ((P_p - P_s)/P_p))] * 100 \qquad \textbf{Ec. 1.}$$

donde *Ps* el peso del residuo seco y *Pp* el peso de las plumas acondicionadas.

2.3.2 Determinación de proteína soluble: La concentración de proteína soluble se determinó mediante el ensayo espectrofotométrico de Biuret [5]. La absorbancia se leyó en un espectrofotómetro UV mini-1240 UV-Vis (HACH DR-2800) a una longitud de onda λ= 550 nm.

2.3.3 Análisis espectrofotométrico UV-Vis: Se empleó un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible (DLAB SP-UV1100) para la determinación de la absorbancia de las soluciones de queratina dializadas y la obtención del espectro de absorción (700 a 200 nm).

2.3.4 Análisis de la estructura por Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) con Reflectancia total atenuada (ATR): Los espectros infrarrojos de transformada de Fourier (FTIR) con reflectancia total atenuada (ATR) de los derivados de queratina liofilizados, se obtuvieron con un espectrómetro Nicolet IS10 (Thermo Fisher Scientific Inc., Rockford, USA) con accesorio de ATR (diamante). Se trabajó en un rango de números de onda desde 4000 a 400 cm^{-1} (60 barridos, resolución de 4 cm^{-1}). Los datos obtenidos se procesaron utilizando el software OMNIC TM de Thermo ScientificTM.

2.4 Análisis estadístico: Se realizó el análisis estadístico de varianza mediante ANOVAS con el software Infostat v. 2013 (Grupo InfoStat, FCA, Argentina), las diferencias se compararon mediante la prueba de Tukey usando un nivel de significancia α= 0,05.

3. Resultados
3.1 Rendimiento de solubilización: La biomasa de plumas acondicionada tiene 91,30 ± 0,5 g de proteína / 100 g biomasa. La solubilidad de la biomasa de plumas de pollo en mezclas binarias DES basadas en L-cisteína se cuantificó a partir de la masa residual en la disolución al finalizar cada ensayo mediante la ecuación (1); los resultados se presentan en la Figura 3. Se registraron buenos rendimientos de solubilización empleando mezclas DES presentando un rango entre 40-70 % de rendimiento cuando se aplican en reacciones de 6 a 12 h y 60 a 90°C, identificando el efecto de la temperatura sobre el tiempo de reacción.
El mecanismo de disolución para la mezcla DES basadas en L-cisteína indica que, inicialmente el ácido láctico compromete los enlaces de la biomasa mediante la conformación de enlaces del tipo puente de hidrógeno con péptidos y otros grupos funcionales. [1]. Estas interacciones permiten que el aminoácido L-cisteína penetre y corte los enlaces disulfuro actuando como agente reductor; al aumentar la accesibilidad del aminoácido se facilita la generación de iones tiol responsables de romper los enlaces disulfuro (S-S) y dando como resultado un aumento de solubilidad y por lo tanto una mayor extracción de la queratina [1].
En el caso de la mezcla L-cisteína/Urea, el segundo compuesto actuara como agente de hinchamiento para desnaturalizar la proteína de estructura cristalina pasando a una estructura amorfa, exponiendo los enlaces disulfuro y dejándolos disponibles para que el aminoácido L-cisteína actúe como agente reductor.

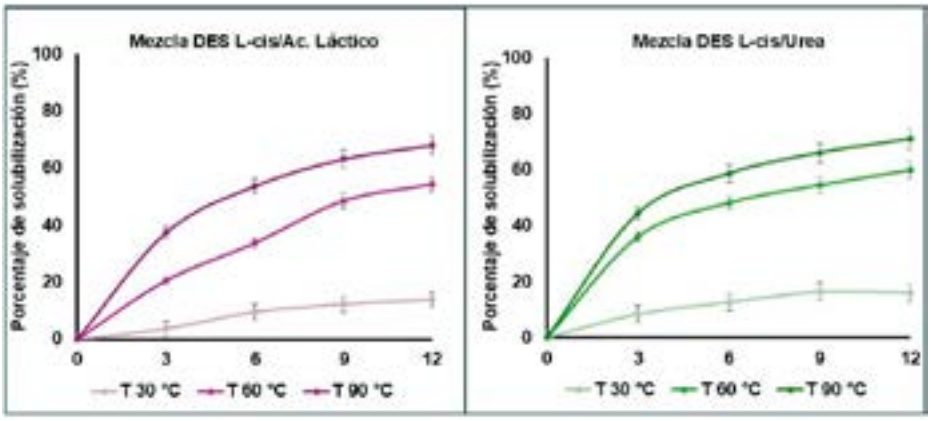


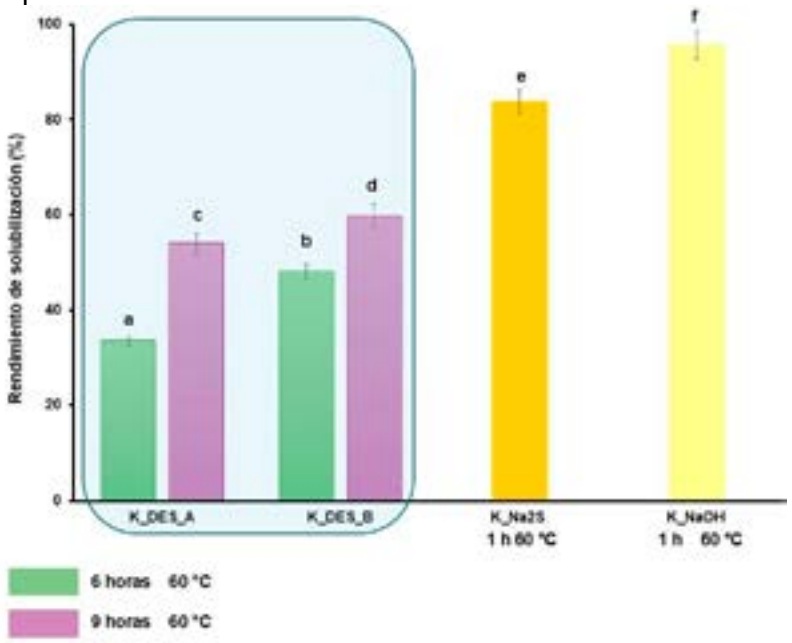
Figura 3. Rendimiento de solubilidad de plumas de pollo por mezclas DES basadas en a) L-cisteína/Ác. Láctico y b) L-cisteína/Urea. Variación de la temperatura y tiempo de reacción.

Efecto de la temperatura: La temperatura es uno de los factores determinantes en la disolución de biomasas ricas en queratina, a mayor temperatura mayor solubilidad. En los casos aplicados **K_DES_A** y **K_DES_B** se observó para un mismo tiempo de reacción, mayor solubilidad al aumentar la temperatura. Un cambio en la temperatura de extracción de 30 a 90 ºC conlleva a un incremento del 50-55 % en la solubilidad de la biomasa. Este comportamiento se debe al incremento de la velocidad de la reacción de reducción que involucra al aminoácido L-cisteína y a los enlaces disulfuro presentes en la queratina, este tipo de reacción redox facilita la ruptura de los enlaces (R-S–S-R), dando como resultado la formación de puentes disulfuro con el aminoácido ($R–S–S–SCH_2CH(NH_2)COO^-$) [1]. Asimismo, el aumento de temperatura reduce la viscosidad de la mezcla DES y promueve la movilidad e interacción de los iones tiol (-SH) que aporta la L-cisteína y los S-S de la matriz rica en queratina. El efecto de la temperatura puede explicarse a partir de dos fenómenos [2]: a) Al aumentar la temperatura, disminuye la viscosidad de la mezcla DES, promoviendo el efecto de transferencia de masa entre la mezcla binaria y la biomasa; además de aumentar el grado de hinchamiento de la biomasa. La sinergia entre la reducción de la viscosidad y el incremento del hinchamiento potencia la difusión del DES hacia la matriz, lo que subsecuentemente intensifica la disolución de la queratina. b) Se favorece la ionización del ácido láctico, resultando en un incremento de la acidez del sistema de disolución; promoviendo la ionización de las secuencias de aminoácidos básicos y debilita las interacciones intermoleculares proteicas. Paralelamente, la elevada acidez promueve la hidrólisis de los enlaces peptídicos. La combinación del debilitamiento de las interacciones intermoleculares y la intensificación de la hidrólisis proteica culmina en el incremento de la solubilidad de la biomasa.

Efecto del tiempo: En el caso del efecto del tiempo, se identifica en el presente estudio que, a mayor tiempo de reacción, mayor fue el rendimiento de solubilización de la biomasa. Como resultado un incremento de la extracción de 3 a 12 horas a 60 y 90 °C produjo un incremento del 26 al 33% en la solubilidad de la biomasa. Este comportamiento es consistente con lo reportado por varios autores [1, 2, 3]. Un mayor tiempo de reacción da más oportunidades para que se genere la ruptura de enlaces disulfuro, necesario para disolver la biomasa.

Comparación con otras metodologías de extracción: Se compararon los resultados obtenidos mediante la aplicación de mezclas DES basadas en L-cisteina y metodologías previamente optimizadas por los autores con reducción (Na2S) e hidrólisis alcalina (NaOH) a 60 ºC y 1 h (Figura 4). A 60 ºC y 6 h, el rendimiento de solubilización las mezclas K_DES_A y K_DES_B presentan rendimientos de extracción (33-48 %) y contenido de proteína soluble (0.13-0.16 g proteína/g biomasa) significativamente menores a los previamente reportados por los autores para los procesos químicos optimizados K_Na_2S y K_NaOH a 60ºC y 1 h, con rendimientos del 89 % (0,25 g proteína/g biomasa) y el 96 % (0,633 g proteína/g biomasa) respectivamente (Figura 4). Un aumento del tiempo de reacción a 9 horas mejora

significativamente el desempeño del proceso para las mezclas DES. Lo anterior puede indicar que, aunque los rendimientos en condiciones de extracción ligeras (60 ºC y 1 h) son bajos, pueden ser mejorados aumentando el tiempo y temperatura de reacción y llegar a ser competitivos con otros métodos químicos. Se debe destacar que el proceso es ambientalmente sustentable y más seguro con el operador; además de conservar las propiedades de la proteína.



*Resultados expresados como el promedio ± desviación estándar de triplicados. Para cada columna, las diferentes letras indican diferencias significativamente según la prueba de Tuckey (p<0,05).

Figura 4. Comparación del rendimiento de solubilidad y de la proteína soluble en disoluciones de queratina obtenidas con mezclas DES basadas en a) L-cisteína/Ác. Láctico y b) L-cisteína/Urea con extracciones por reducción con Na_2S e hidrólisis alcalina con NaOH.

3.2 Caracterización de los derivados de queratina

3.2.1 Análisis Espectrofotométrico UV-Vis: En la figura 5 se presentan los espectros de absorbancia UV-Vis de las disoluciones de queratina dializadas, se observó una banda de absorción máxima entre 200-250 nm; estos resultados concuerdan con los reportados para extractos de queratina a partir de pelaje de conejo [2]. Ge et al., [3] asoció esta banda al sistema conjugado con un doble enlace, el cual puede atribuirse a la existencia de enlaces peptídicos y secuencias de aminoácidos aromáticos presentes en la queratina. Wang et al. [2], reportó para queratina purificada y extraída mediante mezclas DES de colina/ácido oxálico un pico máximo de absorbancia cerca de 272 nm y lo relacionó a las secuencias de aminoácidos aromáticos en la suspensión de queratina.

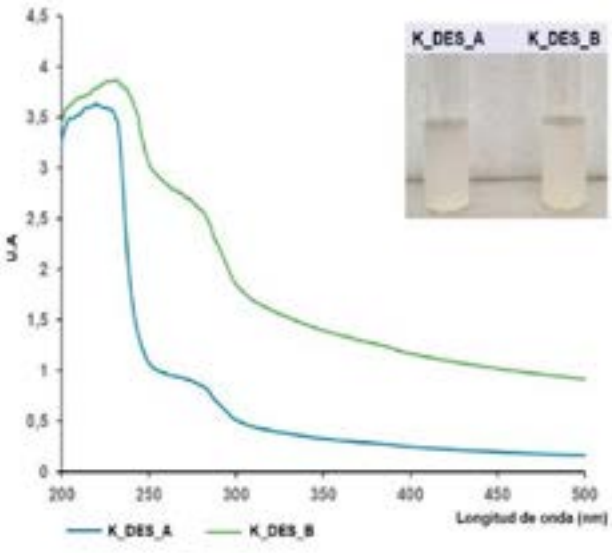


Figura 5. Espectros Uv-Vis a) K_DES_A (L-cisteína/Ác. Láctico); b) K_DES_B (L-cisteína/Urea).

3.2.2 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR): En la figura 6 se presentan los espectros FTIR-ATR de los productos obtenidos mediante las mezclas DES y los previamente obtenidos para los procesos optimizados de K_Na_2S y K_NaOH. Se identifican las bandas en la región 1700 a 400 cm^{-1} correspondientes a los enlaces peptídicos identificados como las Amidas I (1600 a 1690 cm^{-1}; relacionada a las estructuras α-hélice y hoja β-plana, y las vibraciones de v(C=O)), Amida II (1580-1480 cm^{-1}; relacionada con la flexión del δ(N-H) y el estiramiento del enlace v(C-H)) [5,6]. En el caso de la queratina obtenida mediante mezclas L-cisteína/ácido láctico se observan corrimientos en las bandas previamente mencionadas, puede ser debido a las condiciones altamente ácidas de extracción o bien a residuos de reactivos que permanecieron tras el proceso de diálisis. Sin embargo, Okoro et al. [1], reportaron espectros FTIR para queratina obtenida por L-cis/ác- láctico a partir de lana, que coinciden con el obtenido en el presente trabajo.

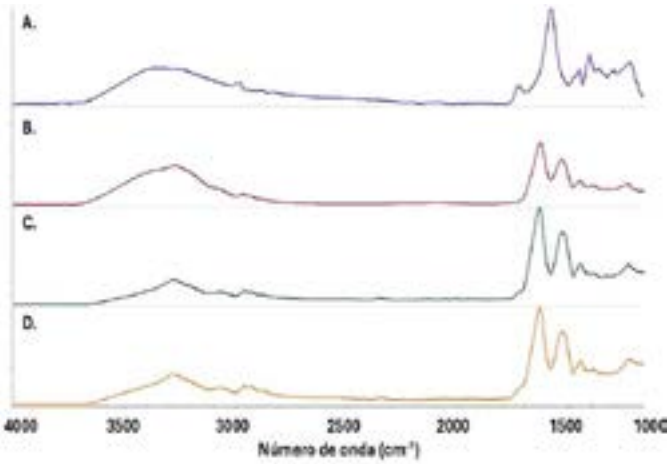


Figura 6. Espectros FTIR-ATR de **A.** K_DES_A, **B.** K_DES_B, **C.** K_Na_2S, **D.** K_NaOH

4. Conclusiones

En este trabajo se estudió y demostró que las mezclas binarias basadas en L-cisteína pueden actuar como solventes eutécticos profundos en la disolución de biomasas ricas en queratina como las plumas de pollo, debido a la capacidad desnaturalizante del ácido láctico (caso A) y de la Urea (caso B) y el efecto reductor del aminoácido L-cisteína. Asimismo, que las variables del proceso como la temperatura y el tiempo de reacción tienen un efecto directo sobre la solubilidad de la biomasa, siendo preponderante el efecto de la temperatura. Las mezclas de DES basadas en L-cisteína constituyen una alternativa viable, sustentable y segura con un alto potencial para la extracción de queratina a partir de biomasa de plumas de pollo, sin causar una destrucción significativa en la estructura de la queratina recuperada (Espectros UV-VIS y FTIR). Esta metodología que puede reemplazar los agentes reductores tradicionales por uno menos contaminante y más económico, es una alternativa viable para la obtención de queratina a nivel industrial y la revalorización de la biomasa generada por la industria avícola.

Referencias

[1] Okoro, O. V., Jafari, H., Hobbi, P., Nie, L., Alimoradi, H., & Shavandi, A. (2022). Enhanced keratin extraction from wool waste using a deep eutectic solvent. *Chemical Papers*, 1-12.

[2] Wang, D., Yang, X. H., Tang, R. C., & Yao, F. (2018). Extraction of keratin from rabbit hair by a deep eutectic solvent and its characterization. *Polymers*, *10*(9), 993.

[3] Nuutinen, E. M., Willberg-Keyriläinen, P., Virtanen, T., Mija, A., Kuutti, L., Lantto, R., & Jääskeläinen, A. S. (2019). Green process to regenerate keratin from feathers with an aqueous deep eutectic solvent. *RSC advances*, *9*(34), 19720-19728.

[4] Ge, N., Zhang, Y., Zhang, H., Cheng, L., & Shi, X. (2021, February). Extraction and characterization of keratin and keratin hydrogels from wasted rabbit hair. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1790, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

[5] Orjuela Palacio, J. M. & Zaritzky, N. E. (2021). Evaluación de las condiciones del proceso de extracción de queratina mediante hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio. In *VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería*

[6] Orjuela Palacio, J. M., Sciammaro, L. P., & Zaritzky, N. E. (2023). Método alternativo de obtención de queratina empleando sulfuro de sodio, sin diálisis, para la reconversión de biomasa de la industria avícola. In *VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería.*

IMPACTO DE VELOCIDADES DE CONGELACIÓN Y COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA EN LA VIABILIDAD DE SEMILLAS CITRICAS PARA SU CRIOPRESERVACION

Orjuela-Palacio Juliana[2]; Zaritzky Noemí[1,2*]; Santos M. Victoria[3]

[1] Depto de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería .Univ. Nacional de La Plata
[2] Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos – Universidad Nacional de la Plata Facultad de Ciencias Exactas (CIC, CONICET, UNLP), La Plata 47 y 116 /n. CP1900.
[3] Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (CONICET, Univ. Nacional del Comahe) *zaritzkynoemi@gmail.com

Introducción.

Argentina cumple un rol relevante en la producción mundial de cítricos, durante 2023-2024 se produjeron 1.7 millones de toneladas (USDA, 2024) y además es el cuarto productor mundial de limones frescos (BID, 2022). La conservación ex situ de germoplasma de especies cítricas es fundamental dado su relevancia en el mercado mundial. *Citrus limon* L. Burm cv. Eureka es una de las variedades más cultivadas y estudiadas; se clasifica como semilla intermedia en cuanto a su fisiología de conservación, requiriendo una deshidratación hasta alcanzar un óptimo de humedad de 18.8% b.h. (actividad acuosa de a_w= 0.64), previo su inmersión en nitrógeno líquido (LN) para su criopreservación (Orjuela-Palacio y col., 2019).

La velocidad a la cual se enfrían semillas en nitrógeno líquido es una variable crítica del protocolo de criopreservación y la transferencia de energía durante el proceso influye directamente en la formación de cristales de hielo intracelular y en las transiciones de fase correspondiente a la fusión de lípidos (Orjuela-Palacio y col., 2019). Un conocimiento y control preciso del protocolo es esencial para minimizar el daño estructural a nivel celular, preservando así la viabilidad y estabilidad genética de las semillas durante el almacenamiento congelado.

La performance del protocolo de criopreservación está directamente relacionada con las características del proceso de congelación, su velocidad y los coeficientes de transferencia de energía que se establecen entre el objeto y el fluido criogénico. Cuando el nitrógeno líquido, cuya temperatura de saturación a 1 atmósfera es -196ºC, entra en contacto por inmersión con una muestra a temperatura ambiente se produce la ebullición del líquido circundante debido a una diferencia de temperatura muy elevada (>200ºC). En este punto comienza un régimen de ebullición en film (Bui y Dhir, 1985; Santos y col., 2013) donde el flujo de calor desde el objeto hacia el nitrógeno líquido se ve disminuido debido a la presencia de una delgada capa o film de nitrógeno vapor que actúa como aislante retardando el enfriamiento. Al fenómeno de ebullición en film también se lo denomina “efecto Leidenfrost”. El objeto se enfría hasta alcanzar una temperatura donde el flujo de calor es mínimo (Temperatura de Leidenfrost, TL). A partir de este punto el film de vapor se desprende bruscamente y el flujo de calor aumenta de manera progresiva alcanzando un valor máximo donde se establece la transición de régimen a ebullición nucleada.

Otro proceso de criopreservación que genera un enfriamiento ultrarrápido consiste en dispersar gotas de fluido criogénico sobre el objeto, también denominada congelación tipo spray. En la congelación spray la transferencia de calor involucra varios mecanismos que pueden darse en simultáneo como son la i) convección, ii) evaporación desde la superficie de la película, iii) ebullición nucleada en la superficie del objeto y iv) nucleación secundaria (Chow y col., 1994).

En la literatura científica existe escasa información acerca de los mecanismos que ocurren durante el enfriamiento y los coeficientes de transferencia de calor que gobiernan los procesos de criopreservación, siendo este conocimiento relevante para optimizar la performance de protocolos y la viabilidad de semillas en bancos de germoplasma vegetal.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) determinar aplicando las ecuaciones de transferencia de energía y el método de "lumped parameters" los coeficientes de transferencia de energía empleando una pieza metálica con la misma geometría de una semilla, sometida a 3 protocolos de criopreservación con distintas velocidades de congelación, b) medir experimentalmente la viabilidad de las semillas sometidas a los tres protocolos de congelación mediante ensayos de tinción con tetrazolio y correlacionar los coeficientes de transferencia de calor de cada protocolo con los % viabilidad para determinar su performance.

Palabras clave: criopreservación, semillas cítricas, coeficientes de transferencia, viabilidad, optimización de protocolos.

Parte experimental

Se construyó una pieza metálica de cobre (99%) con dimensiones similares a las de semillas cítricas utilizadas en experimentos de criopreservación (Fig 1). Se perforó sobre el eje axial la pieza para generar un orificio donde se colocó una termocupla fina tipo T (Cobre-Constantan) conectada a un adquisidor de datos (Testo, Alemania) para el registro de la historia térmica.



L	0.0115 m
Área	3.10×10^{-04} m^2
Volumen	5.05×10^{-07} m^3
ρ	8700 Kg/m^3
Cp	385 J/ Kg K
K	401 W/m K
masa	4.7945×10^{-03} Kg

Figura 1. Imagen de la pieza de cobre construida con dimensiones y geometría similares a las de semillas cítricas, propiedades termo-físicas del cobre.

Se aplicaron los siguientes protocolos experimentales de criopreservación PA) criovial convencional; PB) criovial con perforaciones en la zona inferior y PC) criovial con perforación en la zona superior (ver **Tabla 1**). En el caso del protocolo PA la pieza metálica que representaba la semilla se colocaba desnuda en el criovial. En los casos PB y PC la pieza metálica se colocaba con un recubrimiento de film de aluminio, imitando el procedimiento real utilizado para semillas cítricas que evita una potencial contaminación de muestras debida al contacto directo con el fluido criogénico no estéril.

Los valores de los coeficientes de transferencia globales (U) en los experimentos con la pieza de cobre se calcularon a partir del método de "lumped parameters" que se basa en la resolución de la ecuación diferencial ordinaria (Ec. 1) que considera despreciable la resistencia interna a la transferencia de energía dentro de la semilla de cobre por ser este un metal altamente conductor. Se asume que la temperatura en la superficie del metal es igual a la temperatura en el centro, es decir el perfil de temperaturas en el sólido es uniforme debido a la elevada conductividad térmica del material (conductividad térmica del cobre a 0 ºC es 401 W/m K, Reed y Clark, 1983).

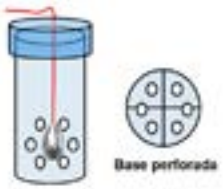
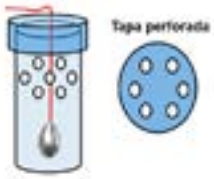
$$\rho Cp V \frac{dT}{dt} = U\,A\,(Ts - T_\infty) \qquad \text{(Ec. 1)}$$

siendo T la temperatura media del objeto altamente conductor, t el tiempo, U el coeficiente global de transferencia de calor, $T\infty$ es la temperatura del fluido externo, A y V son el área y volumen de la pieza metálica que representa la semilla, respectivamente. La solución analítica de esta ecuación es:

$$\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty} = e^{\left[\frac{-UAt}{\rho VCp}\right]} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

donde Ti la temperatura inicial del objeto. Se regresionó el logaritmo natural de las temperaturas experimentales adimensionales en función del tiempo y a partir de la pendiente de la ecuación lineal se obtuvieron los valores de U.
Téngase en cuenta que en todos los casos se calcularon coeficientes globales: En el PA existen dos resistencias en serie a la transferencia de energía (aire en el criovial y la pared plástica que lo rodea); en los casos de PB y PC también hay dos resistencias en serie porque la pieza de cobre estaba recubierta con una delgada lámina de aluminio.

Tabla 1. Descripción de protocolo y dispositivos de criopreservación de semillas

Protocolo	Dispositivo	
PA	**Criovial convencional** (5 mL) Coeficiente global U considera las resistencias en serie a la transferencia de calor dado por el aire y luego la pared plástica en contacto con nitrógeno líquido.	
PB	**Criovial perforación inferior** (5 mL) Coeficiente global U que incluye las resistencias a la transferencia calórica del fluido criogénico que ingresa por la parte inferior y del film de aluminio que recubre la pieza metálica que representa la semilla.	
PC	**Criovial perforación superior** (5 mL) Coeficiente global U que incluye las resistencias a la transferencia calórica del fluido criogénico que ingresa por la parte superior y del film de aluminio que recubre la pieza metálica que representa la semilla.	

Ensayos de viabilidad

Para analizar la viabilidad de semillas sometidas a los tres protocolos se realizó la prueba de Tetrazolio: Se determinó la viabilidad de las semillas previamente deshidratación hasta alcanzar un óptimo de humedad de 18.8% b.h. (actividad acuosa de a_w=0.64) sometidas a los tres protocolos. El grado de desecación previo a su conservación en nitrógeno líquido fue seleccionado en base a una investigación previa de los autores (Orjuela-Palacio y col., 2019) donde se optimizaron las condiciones de desecación de estas semillas categorizadas como intermedias. Se ubicaron 5 semillas por criovial con un total de 30 semillas por protocolo. Las semillas luego de someterse a PA, PB y PC se retiraron de los crioviales y fueron previamente hidratadas por 2 h a 25 ºC, luego se dividieron longitudinalmente a través de la sección media del eje embrionario, una de las mitades se dispuso en una solución 0.5 % (p/v) de tetrazolio (Cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio) a pH= 7 y se incubaron a 25 ºC por 24 h en oscuridad (Patil y Dadlani, 2009). La solución de tetrazolio se descartó y las semillas se lavaron con agua estéril. Las muestras fueron evaluadas individualmente en un estereoscopio Leica MZ 10F con cámara digital DFC490 (Leica Microscopy Systems Ltd,

Germany) y magnificación de 1.25x. Utilizando la lupa estereoscópica se clasificaron las semillas en 3 categorías según su patrón de coloración y la intensidad del color.
Se definen como semillas viables a las de categoría 1 es decir que presenten coloración roja o rosa de sus tejidos en más de un 80% de la superficie.

Resultados y Discusión

Se determinaron los coeficientes globales de transferencia de calor (U) en el proceso de enfriamiento mediante el registro de las historias térmicas en la pieza de cobre 99% que representa la semilla. El coeficiente global de transferencia U obtenido para el PA, fue 30.55 ±1.11 W/m^2 K. No se reporta una TL dado que la semilla no se encuentra en contacto directo con el nitrógeno líquido (por lo tanto no se puede detectar transición entre ebullición en film y nucleada), ya el fenómeno ocurre a nivel de superficie plástica del criovial al sumergirse en el fluido criogénico. En la Figura 2 se muestra la historia térmica en el eje primario (temperatura vs tiempo) y sobre eje secundario la variable y=ln(T*) vs tiempo junto con la regresión lineal aplicada para el cálculo del U a partir de la pendiente.

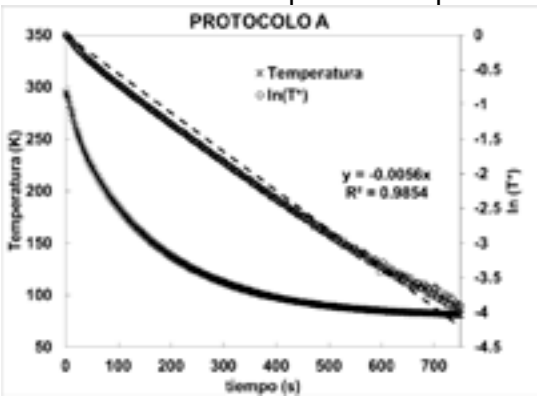


Figura 2. Temperatura y ln (T*) vs tiempo para el enfriamiento en nitrógeno líquido de la semilla de cobre sin recubrimiento en criovial convencional (PA).

En el caso del protocolo B, se puede observar en la Fig. 3 que existen dos zonas con distintos mecanismos y coeficientes de transferencia, siendo los coeficientes de ebullición en film y nucleada 151.68 y 328.74 W/m^{2}K, respectivamente, calculados a partir de dos regresiones lineales. La temperatura de transición o Leidenfrost es T_L = 192.59±14.4 K. En la figura 3 se muestran las historias térmicas experimentales para protocolo B y el ln (T*) vs tiempo para visualizar la existencia de dos zonas definidas con distinta velocidad de transferencia de energía. En la figura 3b se muestran las dos rectas obtenidas a partir de regresiones de ln(T*) vs tiempo.

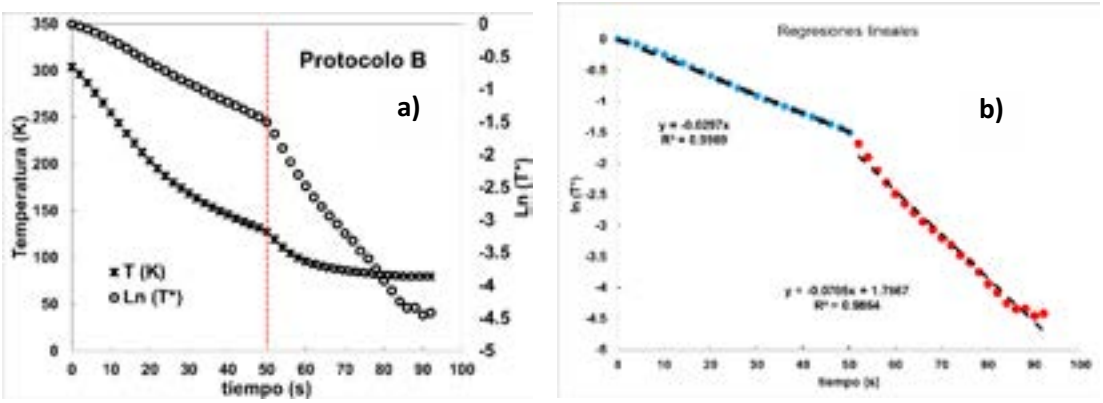


Figura 3. a)Temperatura y ln (T*) vs tiempo para el enfriamiento en nitrógeno líquido de la semilla de cobre con recubrimiento de aluminio en criovial con orificios en la zona inferior (PB), b) Ln(T*) vs tiempo correspondiente a ebullición en film y nucleada junto con la regresión lineal aplicada para el cálculo de U a partir de la pendiente

La Figura 4 muestra la historia térmica y la variable ln(T*) vs tiempo junto con la regresión lineal aplicada para el cálculo de U en el protocolo C .
En el caso de protocolo C se obtuvo el mayor valor de coeficiente global de transferencia U= 440.51 W/m^{2}K. Este incremento del U puede atribuirse a que el mecanismo de enfriamiento es por un proceso tipo spray con nitrógeno líquido. Este enfriamiento ultrarrápido ocurre cuando el nitrógeno líquido ingresa por la zona superior en forma de gotas o lluvia y esto aumenta la velocidad de transferencia de energía debido a que existe un calor latente de vaporización intercambiado. La intensa convección causada por el impacto de las gotas mejora la transferencia de calor entre la superficie del objeto y la superficie libre de la película líquida. El calor transferido a la superficie de la película produce la evaporación del fluido (nitrógeno líquido) y también puede existir una ebullición nucleada en la superficie del objeto. Adicionalmente puede ocurrir una nucleación adicional de burbujas debida al vapor arrastrado por el proceso de aspersión denominado como "nucleación secundaria" (Chow et al., 1994).

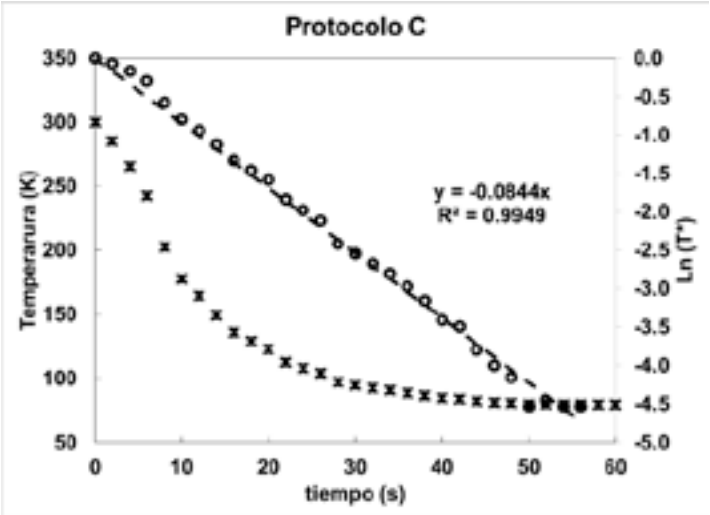


Figura 4. Temperatura y ln (T*) vs tiempo para el enfriamiento en nitrógeno líquido de la semilla de cobre con recubrimiento de aluminio en criovial con orificios en la zona superior (PC).

En síntesis, el protocolo PA mostró los valores más bajos de coeficientes de transferencia siendo la condición más desfavorable en cuanto a velocidad de proceso de enfriamiento. El protocolo B , que se caracteriza por un proceso de inmersión en nitrógeno líquido debido a orificios en zona inferior del criovial, presentó valores más altos en comparación con PA, observándose el fenómeno de Leidenfrost con dos coeficientes que definen el mecanismo de ebullición en film y nucleada del proceso. El protocolo C, cuyo enfriamiento es similar a un spray criogénico debido a los orificios en la zona superior del criovial, obtuvo el valor más alto de coeficiente de transferencia y por lo tanto la mayor velocidad de enfriamiento.

Viabilidad de semillas vs protocolos de criopreservación

La viabilidad de semillas categoría 1 para los protocolos ensayados PA, PB y PC fueron 36.67%, 46.67%, y 53.33%, respectivamente. Como puede observarse la performance del protocolo PC fue superior alcanzando valores de viabilidad más altos. Las semillas utilizadas para testeo de la performance de los tres protocolos fueron deshidratas hasta un valor de actividad acuosa a_w=0.64, que corresponde a una humedad que es igual a la del agua ligada; este valor de agua ligada está en el rango 0.19 y 0.23 g /100 g sólido seco (Orjuela-Palacio y col., 2019). El valor de humedad alcanzado en la deshidratación previa corresponde al óptimo e implica que se minimiza el agua disponible para formación de cristales de hielo que provocan letalidad a las células y tejidos. En la literatura científica está altamente documentado que las velocidades de enfriamiento y calentamiento afectan el grado de formación de hielo en la muestra. A altas velocidades de enfriamiento, la formación de hielo puede evitarse o minimizarse mediante la vitrificación, y la devitrificación o

recristalización se minimiza durante el calentamiento. Cabe resaltar que para semillas deshidratas hasta su punto óptimo de a_w=0.64, al aumentar el coeficiente de transferencia de energía existe un aumento en la viabilidad de semillas, lo cual contribuye a que el agua presente sometida a enfriamiento pase a estado vítreo mejorando su conservación en nitrógeno líquido. En la Figura 5 se puede observar la coloración que alcanzan las semillas viables aplicando un ensayo de viabilidad con tetrazolio.

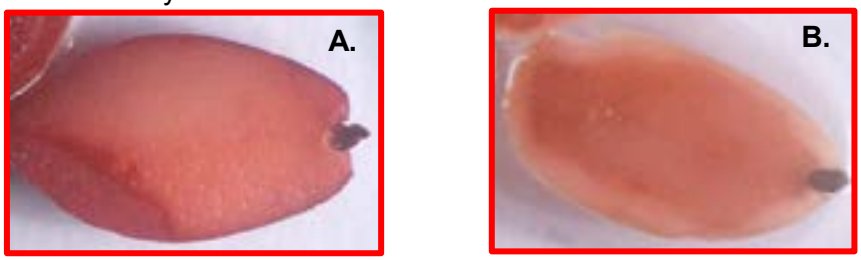


Figura 5. Semillas viables (Categoría 1) que muestran: **(A)** coloración completa y uniforme en el 100% de la superficie; **(B)** coloración uniforme en un 80% de su superficie en la prueba de 2,3,5 -trifeniltetrazolio (TTZ).

Conclusiones

La criopreservación de germoplasma durante largos períodos es de gran importancia para mantener el material genético de semillas *Citrus limon* L. Burm cv. Eureka. Se consideraron tres protocolos de criopreservación con el fin de determinar mediante ecuaciones que representan la transferencia de energía la velocidad del proceso de enfriamiento y su impacto en la viabilidad de semillas cítricas.

Se calcularon los coeficientes globales de transferencia de calor en interfase para los tres protocolos de criopreservación identificando los mecanismos que gobiernan el proceso durante el enfriamiento. En grado ascendente en cuanto a su performance se determinó que el protocolo convencional (A) es el que mostró el menor valor de coeficiente, debido a las resistencias en serie que el objeto presenta para enfriarse de manera rápida (aire y pared plástica). En segundo lugar se ubica el protocolo B, que presentó valores más altos comparados con el protocolo A. Para el protocolo B se evidenció la existencia de una ebullición en film en la primera etapa y luego ebullición nucleada, debido a que los orificios en zona inferior del criovial generan una inmersión del objeto en el nitrógeno líquido. Por último, el protocolo que mejor performance obtuvo debido a su similitud con un proceso de spray criogénico fue el protocolo C, donde los orificios estaban en la zona superior del criovial. Se puede concluir que se observó una tendencia en los resultados ya que cuanto mayor fue el valor del coeficiente de transferencia U del proceso en el protocolo, mayor fue el porcentaje de viabilidad alcanzado de las semillas, siendo el protocolo C con perforaciones superiores el que mostró la mejor performance.

Referencias

BID 2022. Cooperación público-privada para la exportación de limones desde Argentina y cítricos desde Uruguay.

Bui, T.D., y Dhir, V.K. Film boiling heat transfer on an isothermal vertical surface. *Heat Transfer Trans ASME* (1985) **107**:764–771.

Chow, L C Sehmbey, M S Hahm, 0 J Chui C J (1994). Fundamental Studies In Cryogenic Cooling Of Power Electronics. University Of Kentucky. Department Of Mechanical Engineering. Lexington Ky 40506-0046

Orjuela-Palacio J.M., Graiver N., Santos M.V., Zarizky N. (2019) Effect of the desiccation tolerance and cryopreservation methods on the viability of Citrus limon L. Burm cv. Eureka sedes. Cryobiology 89, 51-59.

Patil VN., Dadlani M.(2009).Tetrazolium test for seed viability and vigour. Handbook of Seed Testing: 209-241.

USDA Report 2024. Number: AR2023-0010 Name: Citrus Semi-annual.

Reed R. P., Clark A. F. Materials at Low Temperatures., ed., American Society for Metals.1983

REVALORIZACIÓN DE BIOGRÁNULOS COMO MATERIAL ADSORBENTE DE FLÚOR

Camila Vazquez[a], Alejandro Caravelli[a], Cintia Lobo[a]

[a] Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA-CONICET-UNLP-CIC), Calle 47 esq.116 (CP 1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina cclobo@quimica.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En los recientes años, el sistema biológico de tratamiento de aguas residuales basado en biogránulos aeróbicos ha demostrado ser más efectivo en la remoción conjunta de contaminantes tóxicos frente al sistema tradicional de lodos activados. Los biogránulos aeróbicos son agregados microbianos suspendidos altamente estructurados y con excelentes propiedades de sedimentación. La formación de biogránulos se ve favorecida en reactores en columna con un régimen de operación bajo condiciones alternantes de disponibilidad de carbono orgánico (fase “feast”) e inanición (fase “famine”) junto con un caudal de aire ascendente. Un aspecto a considerar en estos tratamientos es el aprovechamiento de los biogránulos generados para lograr un sistema sustentable. En este sentido, los biogránulos pueden ser un recurso prometedor como material bioadsorbente de contaminantes en agua debido a su escaso costo, buenas propiedades mecánicas y de sedimentación. El término biosorción se usa para indicar una cantidad de procesos independientes del metabolismo tales como: adsorción física y química, interacción electrostática, intercambio iónico, complejación, quelación y microprecipitación, que tienen lugar esencialmente en la pared celular. Las sustancias poliméricas extracelulares, así como la superficie celular microbiana, presentan carga eléctrica negativa, por lo tanto pueden funcionar como un intercambiador de iones para cationes (Fe^{+3}, Ca^{+2}, Mg^{+2} y NH_4^+) y metales pesados (Wang et al., 2014). El proceso de biosorción en biogránulos puede constituir una alternativa económica, sustentable y sencilla para la remoción de contaminantes como el Flúor (F). El F se encuentra presente en aguas subterráneas; si bien se recomienda su ingesta para la salud ósea y dental, el exceso de consumo puede generar problemas de salud. Por ello, el Código Alimentario Argentino estableció un rango permitido de F de 0.6 a 1.7 mg/L en agua de consumo. Para remover F de aguas de consumo se utiliza por ejemplo ósmosis inversa que suele generar efluentes con altas concentraciones de F. Los objetivos del presente trabajo fueron obtener biogránulos estables en el tratamiento de un agua residual de industria láctea y revalorizar los biogránulos generados como material adsorbente para la remoción de F.

METODOLOGÍA

Generación de biogránulos. El cultivo de biogránulos se llevó a cabo en un reactor en batch secuencial (SBR) con un medio de cultivo simulado de industria láctea: suero de queso como fuente de carbono y medio mineral (Bucci et al., 2020). El caudal de aire superficial ascendente fue 0.6-0.83 cm/seg, conforme a los valores recomendados en bibliografía para lograr granulación de la biomasa a bajas cargas orgánicas (Bucci et al., 2022). El SBR se operó con ciclos sucesivos de 24 hs con las siguientes fases: alimentación del efluente (2 min), reacción aeróbica (1430 min), purga de biomasa (2 min), fase de sedimentación (1-5 min) y extracción del sobrenadante o efluente clarificado (2 min). Se aplicó una carga orgánica de 1.07 g DQO/(L.día) y un tiempo de residencia celular (TRC) de 20 días.
Funcionalización de biogránulos con hierro (Fe) y ensayos de adsorción. Se funcionalizaron gránulos molidos secos mediante la impregnación con Fe soluble 1.2 g/L en dos

condiciones: pH 1.5 y pH 3.5 durante 2 h. Los biogránulos funcionalizados se lavaron con agua destilada y se secaron en estufa a 40°C con convección durante 24 hs (Wang et al. 2014). Se analizó el efecto de la dosis de gránulos funcionalizados como adsorbente (8.75 y 20.28 g/L) y la dosis de Fe utilizada en la funcionalización (1.2 y 4 gFe/L) sobre la eficiencia de adsorción de F. Los ensayos se realizaron a 200 rpm durante 2 h, luego las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm y se determinó la concentración de F remanente con electrodo selectivo de F HACH modelo ISEF 121. Se estudió el % de remoción como:

$$\%\,Remoción = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100 \quad (1)$$

donde Ci es la concentración inicial de F en la solución (mg/L), Cf (mg/L) es la concentración final de F en la solución a un determinado tiempo. Además, se calculó la capacidad de adsorción como:

$$q = \frac{(Ci - Cf).V}{m} \quad (2)$$

donde q (mg/g) es la capacidad de adsorción es decir el F total adsorbido por g de material adsorbente, V (L) es el volumen de la solución y m (g) es la masa seca de adsorbente.
Caracterización de biogránulos. Se observó el tamaño y morfología de los biogránulos generados en un estereomicroscopio Leica MZ 10F (Alemania) con cámara fotográfica (Leica DFC 490, Alemania). La estructura y composición de gránulos pre y post funcionalización con Fe se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido con detector de rayos X dispersivo en energías (SEM-EDS). Las muestras fueron recubiertas en carbono para su análisis. Los espectros de absorción de los gránulos y gránulos funcionalizados con Fe pre y post adsorción de F se analizaron mediante en un espectrómetro Thermo Nicolet iS10 (Thermo Scientific, NJ, EE. UU.), equipado con un accesorio Golden Gate Single Reflection Diamond (ATR). Los espectros se obtuvieron entre los 525–4000 cm^{-1} mediante 32 escaneos con una resolución espectral de 4 cm^{-1}.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Generación de biogránulos en reactor en batch secuencial (SBR) en columna. El SBR (Fig. 1.a.) fue operado con períodos de disponibilidad de carbono orgánico e inanición (régimen “Feast/Famine”). Las imágenes de los biogránulos obtenidos se encuentran en Fig.1.b. En determinados TRC transcurridos se evaluó la remoción del suero de queso en función del tiempo. En general, una fase “feast” adecuada debería tener una duración no superior al 20-30% de la duración total del ciclo. Como se observa en la Fig.1c. en la fase inicial (“Feast”, 4-5 hs) se produjo el consumo de más del 75% del suero de queso para crecimiento de biomasa y acumulación de reservas de carbono endógeno. El consumo de suero fue determinado como Demanda Química de Oxígeno (DQO) que corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica oxidable presente en un agua residual y es por tanto una medida representativa de su contaminación orgánica. Los valores finales obtenidos cumplen con el límite de descarga de DQO, establecido por la Pcia. de Bs As (Resolución 336/03), para conducto pluvial o cuerpo de agua superficial de ≤250mgDQO/L.

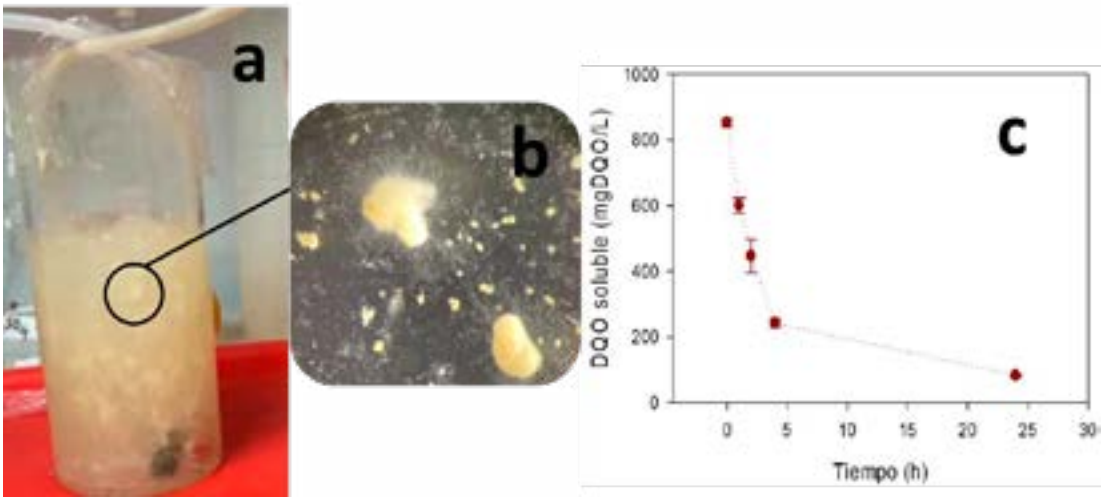


Figura 1. a. Imagen del SBR en columna utilizado en la generación de biogránulos. **b.** Imagen tomada con Lupa de los biogránulos obtenidos. **c.** Variación de DQO soluble en función del tiempo para un ciclo de operación del SBR.

Adsorción de F en gránulos funcionalizados con Fe. El incremento de pH 1.5 a 3.5 mejoró el % de remoción de F desde 7.29±1.8 a 24.33±0.77 %; la capacidad adsorción q fue 0.43±0.10 y 1.64±0.24 mg/g para pH 1.5 y 3.5 respectivamente (Fig. 2). Esto pudo deberse a fenómenos de atracción electrostática de F^- en la superficie de la biomasa funcionalizada con Fe. HF posee un pKa de 3.14, la proporción de anión F^- se incrementa a medida que el pH aumenta de 1 a 5. Por lo tanto, a pH 1.5 la especie predominante es HF; a pH 3.5 cerca del 60% se encuentra como F^-.

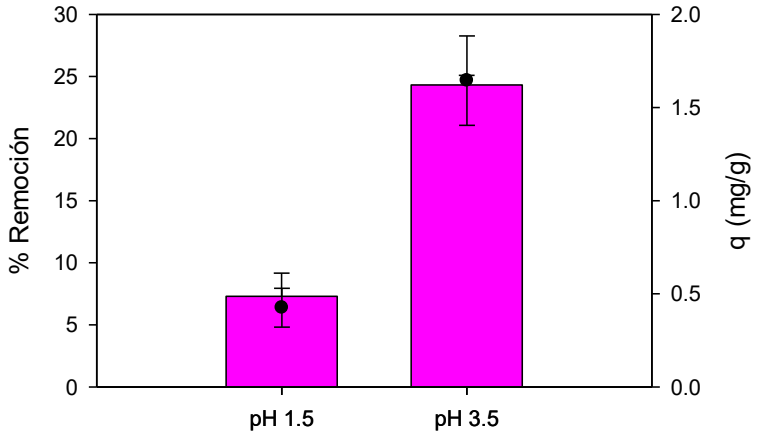


Figura 2. Efecto del pH de funcionalización sobre el % de Remoción (▮) y Capacidad de adsorción (q; mg/g) (●) de Flúor. Condiciones: gránulos funcionalizados con 1.2 g/L de hierro soluble a pH 1.5 y pH 3.5, tiempo de contacto 2h, agitación 200 rpm, temperatura constante. Concentración inicial de Flúor 57 mg/L, dosis de adsorbente seco de 10.25±0.86 g/L y 8.53± 1.54 g/L para pH 1.5 y 3.5 respectivamente.

Se analizó la remoción de F (concentración inicial= 57 mg/L) en función de la dosis de adsorbente, 8.53±1.54 y 20.28±0.05 g/L de gránulos funcionalizados a pH 3.5 con 1.2 g/L de Fe (Fig. 3.a). El aumento de dosis de adsorbente produjo un leve incremento del % remoción de 24.33±0.77 a 29.31±1.06 %, mientras que q disminuyó de 1.64±0.24 a 0.82±0.03 mg/g, para dosis de 8.53 y 20.28 g/L respectivamente. Finalmente, se analizó la remoción de F con gránulos funcionalizados con 1.2 y 4 g/L de Fe (Fig. 3.b). Cuando se incrementó la concentración de Fe a 4 g/L en la funcionalización se obtuvo leve aumento del % remoción de 24.31±0.77 a 28.48±1.37%. Sin embargo, la capacidad de adsorción q fue similar, 1.64±0.24 y 1.59±0.078 mg/g para concentración de Fe de 1.2 y 4 g/L respectivamente.

Considerando los valores de q se establecieron las condiciones óptimas para la remoción de F: dosis de 10 g/L de gránulos, pH de 3.5 y funcionalización con 1.2 g/L de Fe. Los valores obtenidos de capacidad de adsorción de F en gránulos en este trabajo son similares a los obtenidos por Oh et al. (2009). Estos autores informaron capacidad q de 1.9 mgF/g para 180 mg/L de F utilizando lodos activados secos (10 g/L) a pH 5. Vinitnantharat et al. (2010) informaron un q 0.84 mg/g para 10 mg/l de F a pH 7 con dosis de 10 g/L de lodos de un proceso de coagulación tratados con ácido.

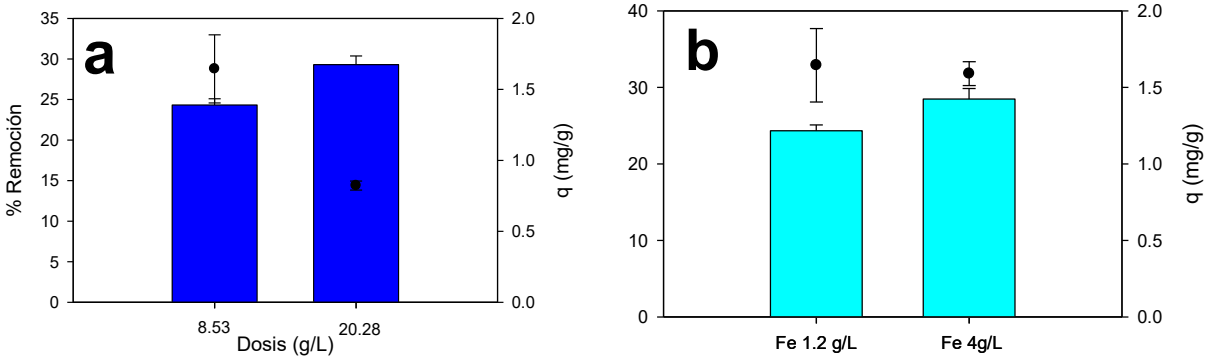


Figura 3. a. Efecto de la dosis de gránulos funcionalizados sobre el % de Remoción (▮) y Capacidad de adsorción (q, mg/g) (●) de Flúor. **b.** Efecto de la dosis de Fe para la funcionalización sobre el % de Remoción (▮) y Capacidad de adsorción (q, mg/g) (●) de Flúor. Condiciones: tiempo de contacto 2h, agitación 200 rpm, temperatura constante, concentración inicial de Flúor 57 mg/L, pH 3.5.

Caracterización microestructural de gránulos por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Se analizó la morfología de la superficie de gránulos obtenidos pre y post funcionalización con Fe a pH 3.5. Los gránulos presentaron estructura compacta y presencia de cavidades (Fig. 4a, b). En la superficie se observan filamentos y matriz extracelular donde se encuentran inmersas bacterias, esta matriz compacta puede ser asociada a la elevada producción de exopolisacáridos que desempeñan un rol esencial en la formación de gránulos (Krysiak-Baltyn et al. 2019). En los espectros EDS obtenidos de gránulos (Fig. 4c y d) se observa la presencia mayoritaria de Carbono (C), Oxígeno (O), fósforo (P). Post funcionalización con hierro se obtuvo un incremento del pico correspondiente a hierro (Fe; Fig. 4d). En la Fig. 4.e se encuentran los espectros FTIR obtenidos para gránulos sin funcionalizar, gránulos funcionalizados con Fe a pH 3.5 y gránulos funcionalizados con Fe a pH 3.5 post adsorción de F 57 mg/L. En el espectro FTIR de gránulos sin funcionalizar se observa una banda ancha a 3283 cm^{-1} asignada al estiramiento O-H y N-H, vibraciones del estiramiento C-H a 2922 cm^{-1}, la vibración del enlace C=O a 1730 cm^{-1}. Se evidencia la vibración del estiramiento del enlace peptídico C-N (amida I) de proteínas en 1637 cm^{-1} y la vibración de deformación del enlace peptídico N-H (amida II) de proteínas a 1529 cm^{-1} (amida II). Se observa la deformación de C-H a 1450 cm^{-1} correspondiente a polisacáridos, la flexión C-H a 1385 cm^{-1}, la vibración de péptidos a 1240 cm^{-1} y estiramiento de grupos OH en 1025 cm^{-1} (Domingos et al. 2021). La región de la huella digital se encuentra entre 900 y 600 cm^{-1}, en la cual están presentes picos de vibración de aminoácidos y ácidos nucleicos donde se produce el estiramiento característico de estos grupos. Post funcionalización con Fe a pH 3.5 se observó la disminución del pico a 1450 cm^{-1} correspondiente a polisacáridos, a 1385 cm^{-1} del enlace C-H y a 1240 cm^{-1} de vibración del grupo carboxilo. Estas modificaciones pueden corresponder a la posible interacción electroestática de la matriz extracelular de los gránulos con Fe (Sun et al. 2011). Post adsorción de F se observó la disminución de la banda correspondiente a la banda ancha a 3283 cm^{-1} asignada al estiramiento O-H y a la vibración del estiramiento C-H a 2922 cm^{-1}, además se acentuó la disminución de los picos a 1385 cm^{-1} del enlace C-H y a

1240 cm^{-1} correspondiente a la vibración de péptidos, lo cual indicó la posible interacción de estos grupos de la matriz extracelular con Fe y F.

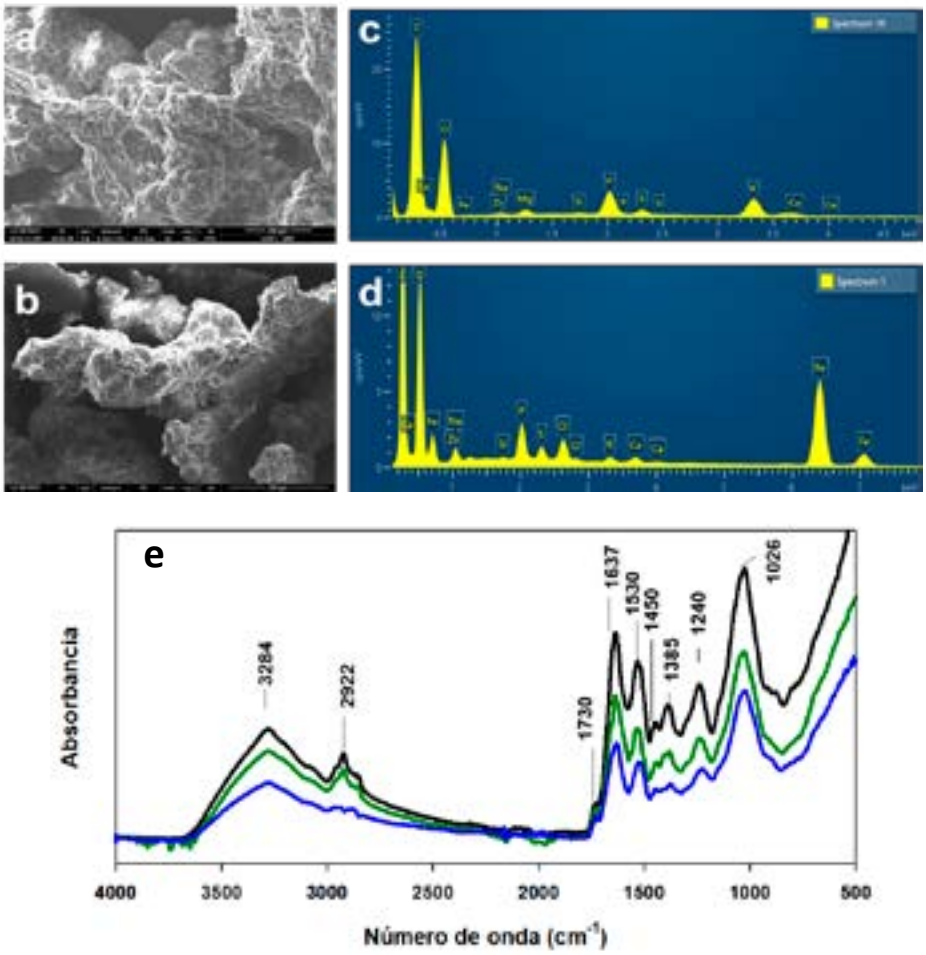


Figura 4. Imágenes de gránulos obtenidas por SEM. **a.** Gránulos obtenidos en SBR. **b.** Gránulos funcionalizados con hierro pH 3.5. Espectros de microanálisis por EDS. **c.** gránulos de SBR. **d.** Gránulos funcionalizados con hierro pH 3.5. **e.** Espectro FTIR de gránulos sin funcionalizar (**-**), gránulos funcionalizados con Fe (1.2 g/L) a pH 3.5 (**-**) y gránulos funcionalizados con Fe (1.2 g/L) a pH 3.5 post adsorción de F 57 mg/L (**-**).

CONCLUSIONES

La operación del SBR en columna con flujo de aire ascendente y períodos de disponibilidad de carbono orgánico e inanición (régimen “Feast/Famine”) permitió obtener biogránulos estables. Además, se observó una remoción superior al 75% del suero de queso (fuente de carbono) para crecimiento de biogránulos en el SBR en 4 h. Los biogránulos obtenidos se funcionalizaron con Fe como material bioadsorbente de F. Se analizaron la influencia del pH, dosis de adsorbente y dosis de Fe en la funcionalización para la adsorción de F. Los resultados indicaron que el pH influyó sobre la eficiencia de remoción de F, mientras que el incremento de la dosis de Fe en la funcionalización y la dosis de gránulos tuvieron un leve efecto sobre el % de Remoción de F. Se observó la estructura y composición de los biogránulos por Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (SEM-EDS), confirmando la presencia de Fe post funcionalización. En los espectros obtenidos por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR),

se observaron cambios en grupos funcionales presentes en la matriz extracelular de los biogránulos funcionalizados con Fe post adsorción de F. Estos resultados indicaron que la matriz extracelular de los biogránulos podría interaccionar con Fe y F durante la adsorción. Los biogránulos generados en tratamientos de efluentes mediante SBR constituye un material que puede ser aprovechado y revalorizado como adsorbente de otros contaminantes en agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bucci, P., Coppotelli, B., Morelli, I., Zaritzky, N., & Caravelli, A. J. J. o. W. P. E. (2020). Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification of wastewater in granular reactor: microbial composition by next generation sequencing analysis. 36, 101254.

Bucci, P., Coppotelli, B., Morelli, I., Zaritzky, N., & Caravelli, A. J. J. o. W. P. E. (2022). Micronutrients and COD/N ratio as factors influencing granular size and SND in aerobic granular sequencing batch reactors operated at low organic loading. 46, 102625.

Domingos, D. G., Libardi, N., Henriques, R. O., Xavier, J. A., da Costa, R. H. R. J. B., & engineering, b. (2021). The effect of Np-magnetite on the granulation process of an SBR reactor used for domestic wastewater treatment. 44(1), 161-171.

Krysiak-Baltyn, K., Cavalida, R., Thwaites, B., Reeve, P. J., Scales, P. J., Van den Akker, B., . . . Gras, S. L. J. J. o. W. P. E. (2019). Comparison of physical characteristics and dewatering behaviour between granular and floccular sludges generated from the same sewage source. 29, 100785.

Oh, T.-K., Chikushi, J., & Saeki, K. (2009). The adsorption of hydrogen fluoride and fluoride ion on a water treatment sludge.

Sun, X.-F., Liu, C., Ma, Y., Wang, S.-G., Gao, B.-Y., Li, X.-M. J. C., & Biointerfaces, S. B. (2011). Enhanced Cu (II) and Cr (VI) biosorption capacity on poly (ethylenimine) grafted aerobic granular sludge. 82(2), 456-462.

Vinitnantharat, S., Kositchaiyong, S., & Chiarakorn, S. (2010). Removal of fluoride in aqueous solution by adsorption on acid activated water treatment sludge. Applied Surface Science, 256(17), 5458-5462. doi:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.12.140

Wang, L., Wan, C., Lee, D.-J., Liu, X., Zhang, Y., Chen, X., & Tay, J.-H. J. B. t. (2014). Biosorption of antimony (V) onto Fe (III)-treated aerobic granules. 158, 351-354.

SINTESIS DE MATRICES DE QUITOSANO COMERCIAL CON DISTINTO GRADO DE DESACETILACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y FLÚOR EN AGUAS

Cristian Corimayo[a], Cintia Lobo[a], Tatiana Arturi[b], Nora Bertola[a], Noemí Zaritzky[a,b]

[a]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA-CONICET-UNLP-CIC) UNLP 47 y 116 s/n La Plata) [b] Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 1 y 47, La Plata cclobo@quimica.unlp.edu.ar Investigadora Asistente CIC

INTRODUCCIÓN

En la llanura Chaco-Pampeana se ha informado la coexistencia de Arsénico (As) y Flúor (F) en aguas subterráneas con un riesgo potencial por ingesta para millones de personas. Debido a los graves efectos de estos contaminantes sobre la salud en la Provincia de Buenos Aires la ley provincial N11.820 del año 1993 estableció un límite máximo de 0.050 mgAs/L y el Código Alimentario Argentino estableció un rango permitido de F de 0.6 a 1.7 mg/L para agua de consumo de red. Actualmente, una alternativa viable puede ser la adsorción de As y F en adsorbentes de bajo costo, por simplicidad, bajos costos de mantenimiento y operación. El empleo de residuos agrícolas o industriales para sintetizar adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas está ganando más atención como un medio simple, eficaz, económico y amigable con el medioambiente. Recientemente se ha incrementado el interés en la obtención de compuestos bioactivos y biopolímeros a partir de residuos agroalimentarios como fuente de materias primas. El exoesqueleto de crustáceos procedente de desechos de la industria pesquera se compone principalmente de quitina, segundo polisacárido natural más abundante. Por desacetilación la quitina se transforma en quitosano, un polielectrolito catiónico de gran interés. La quitina (poli-β-(1,4)-N-acetil-D-glucosamina), segundo polisacárido natural más abundante, por desacetilación se transforma en quitosano (poli-β-(1,4)-D-glucosamina-N-acetil-D-glucosamina), un polielectrolito. Trabajos previos indican que la combinación de quitosano con Fe puede incrementar la efectividad de remoción individual de As (Lobo, et al, 2020) y la combinación de quitosano con Ca ha sido efectiva para la remoción de F (Scheverin, et al, 2022).
El objetivo de este trabajo fue evaluar tres quitosanos para la síntesis de matrices de quitosano funcionalizadas con Fe para remover As y matrices de quitosano funcionalizadas con Ca para remover F.

METODOLOGÍA

Grado de desacetilación de los quitosanos empleados. Para obtener las matrices de quitosano, se utilizaron tres quitosanos comerciales denominados Q1 (Sigma Aldrich, peso molecular medio, Estados Unidos), Q2 (QPampa peso molecular alto, Argentina) y Q3 (Parapharn peso molecular medio, China).
Se determinó el grado de desacetilación (%DD) de cada quitosano en espectrómetro Thermo Nicolet iS10 (Thermo Scientific, NJ, EE. UU.), equipado con un accesorio Golden Gate Single Reflection Diamond (ATR). Los espectros de los flakes de quitosano se obtuvieron entre los números de onda de 525–4000 cm^{-1} mediante 32 escaneos con una resolución espectral de 4 cm^{-1}. Se determinó la absorbancia de los picos a 1320 cm^{-1} ($A1320cm^{-1}$) correspondiente a la absorbancia del grupo funcional amina III y 1420 cm^{-1}. Finalmente, el %DD se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ DD} = 100 - [31.92 \times (A1320\ cm^{-1}/A1420\ cm^{-1}) - 12.20] \quad (1)$$

Síntesis de matrices de quitosano. Se sintetizaron matrices de quitosano con Fe para la remoción As, para ello cada quitosano fue disuelto en la solución de $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ y ácido acético a 50ºC bajo agitación constante, para obtener un hidrogel con 0.7% p/p de Fe en 100g de quitosano. Posteriormente, se sintetizaron matrices mediante gelificación

ionotrópica por goteo en NaOH 0.5 M y se secaron en estufa convectiva a 40°C. Las matrices con Fe obtenidas con los distintos quitosanos se denominaron Q1Fe, Q2Fe y Q3Fe. Por otro lado, se sintetizaron matrices de quitosano con Ca y Fosfato para la remoción de F. Estas matrices se obtuvieron a partir de $CaCl_2$ (0.7gCa) y KH_2PO_4 0.1g en 100g solución de ácido acético 0.1M y 1 g de quitosano en agitación a 50°C. Las matrices con Ca se formaron mediante gelificación ionotrópica por goteo del hidrogel en NaOH 2M y se secaron en estufa convectiva a 40°C. Las matrices obtenidas con quitosano y Ca se denominaron Q1Ca, Q2Ca y Q3Ca, según el quitosano utilizado en su síntesis.

Remoción de Arsénico (As) con matrices de quitosano y Fe y remoción de Flúor (F) con matrices de quitosano y Ca. Se analizó la remoción de As inicial de 0.3 mgAs/L en matrices Q1Fe, Q2Fe y Q3Fe a pH 5.2, Temperatura 30°C, dosis de matrices de 1 g/L y tiempo de contacto de 6 h. Además, se analizó la cinética de remoción de 0.3 mg/L de As inicial en Q1Fe y Q2Fe y se modelaron los resultados obtenidos. Las matrices de quitosano con Ca Q1Ca, Q2Ca y Q3Ca se evaluaron como adsorbentes de 9.6 mgF/L inicial a pH 5.2, temperatura 30°C, dosis de matrices de 10 g/L y tiempo de contacto de 6 h. Finalmente, se analizó la cinética de remoción de 9.6 mgF/L en Q1Ca y Q2Ca y se modelaron los resultados obtenidos.
La cuantificación de As remanente luego de la adsorción se realizó mediante la técnica colorimétrica con azul de molibdato donde se determina As en presencia de ácido ascórbico y solución complejante de molibdato de amonio que forman el complejo antimonil-arsenomolibdato. La intensidad de este complejo se determina por absorbancia a 860nm (Lenoble, et al., 2003). El F remanente se determinó mediante el método colorimétrico SPADNS kit Hach 8029, en espectrofotómetro (Hach DR/2800). Para cada ensayo de adsorción se determinó el % de remoción como:

$$\%Remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (2)$$

donde Ci es la concentración inicial de As o F en la solución (mg/L), Cf (mg/L) es la concentración final de As o F en la solución a un determinado tiempo. Además, se calculó la capacidad de adsorción como:

$$q = \frac{(C_i - C_f) * V}{m} \quad (3)$$

donde q (mg/g) es la capacidad de adsorción es decir el As o F total adsorbido por g de material adsorbente, V (L) es el volumen de la solución y m (g) es la masa seca de adsorbente.
Para determinar la cantidad de As o F adsorbido y las velocidades del proceso, los resultados de cinética de adsorción obtenidos fueron evaluados aplicando cinéticas de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden. La ecuación de pesudo primer orden puede expresarse de forma lineal como:

$$Ln(q_e - q_t) = Ln(q_e) - K_1 t \quad (4)$$

donde q_e y q_t (mg/g) son las capacidades de adsorción en el equilibrio y a distintos tiempos. K1 (1/h) corresponde a la constante de velocidad de pseudo primer orden. La ecuación cinética de pseudo segundo orden puede expresarse de forma lineal como:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{K_2 q_e^2} \quad (5)$$

donde K_2 (g/(mg h)) corresponde a la constante de velocidad de pseudo segundo orden. Se evaluó el ajuste a cada moldeo mediante el coeficiente de determinación (r^2), la suma de errores al cuadrado (SSE) y el error relativo promedio (ARE) (Foo & Hameed, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

***Grado de desacetilación (%DD) de los quitosanos utilizados*.**

La quitina es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza; este polímero está presente en paredes de hongos, exoesqueletos de crustáceos, artrópodos e insectos. El quitosano es un biopolímero que se obtiene a partir de quitina mediante una reacción de desacetilación que elimina al menos un 50 % de sus grupos acetilo. El grado de desacetilación (%DD) es un valor que da información de la cantidad de grupos aminos libres en el quitosano.

El %DD para Q1, Q2 y Q3 fue de 76.93±2.96%, 89.64±1.11% y 81.23±0.37%, respectivamente (Tabla 1). Los tres quitosanos presentaron un %DD mayor a 76%, la presencia de una mayor proporción de grupos amino puede favorecer su aplicación como adsorbente de iones de metales pesados como Cr(VI), Pb(II), Cd(II), Cu(II), colorantes catiónicos y aniónicos, fenol y otras moléculas orgánicas como antibióticos (Da Silva et al., 2021). A partir de estos quitosanos se obtuvieron matrices funcionalizadas con Fe y Ca, que presentaron estructura estable y forma aproximadamente esférica.

Tabla1. Grado de desacetilación (DD%) y peso molecular (PM) de los quitosanos analizados

Quitosano comercial	DD%	PM
Q1	76.932	medio
Q2	89.64	alto
Q3	81.23	medio

Remoción de As en matrices de quitosano con Fe.

Los resultados obtenidos de remoción de 0.3 mgAs/L inicial en Q1Fe, Q2Fe y Q3Fe se encuentran en la Fig. 1a. Como puede observarse para los quitosanos utilizados el % de Remoción de As fue superior a 90% en 6 horas de contacto. La concentración final de As obtenida fue de 0.014±0.0002 mgAs/L, 0.023± 0.042 mgAs/L y 0.020± 0.003mgAs/L para Q1Fe, Q2Fe y Q3Fe, respectivamente. Estos valores se encuentran debajo del límite establecido por Pcia. de Bs As en la ley provincial No11.820 del año 1993 estableció un límite máximo de 0.050 mgAs/L para agua de red.

La capacidad de adsorción de As de las matrices obtenidas fue de 0.290±0.007 mgAs/g, 0.260±0.06 mgAs/g y 0.280±0.02 mgAs/g para Q1Fe, Q2Fe y Q3Fe, respectivamente. La capacidad de adsorción de Q1Fe y Q3Fe fue levemente superior a la obtenida con Q2Fe. Esto pudo deberse a que el peso molecular de quitosano puede tener un efecto sobre la capacidad de adsorción. Younis et al. (2019), analizaron el efecto de muestras de quitosano con diferentes pesos moleculares para la remoción de metales pesados. Estos autores observaron que el decrecimiento en el peso molecular favoreció la adsorción de metales pesados. En este trabajo las matrices Q1Fe y Q3Fe estaban compuestas por quitosano de peso molecular medio, en cambio Q2Fe fue sintetizada con quitosano de peso molecular alto (Tabla1), lo cual pudo haber tenido un leve efecto de disminución de la capacidad de adsorción. El grado de desacetilación de quitosano también puede tener un efecto sobre la adsorción (Guibal et al. 2014). Saha et al., 2005, evaluaron la adsorción de un colorante azoico en flakes de quitosano con distinto grado de desacetilación. Estos autores concluyeron que los flakes de quitosano de mayor grado de desacetilación presentaron mayores porcentajes de remoción del colorante debido a la mayor proporción de grupos amino e hidroxilos. Sin embargo, la diferencia en %DD de los quitosanos utilizados para sintetizar las matrices no evidenció un efecto sobre la capacidad de adsorción de As. Se analizó la cinética de remoción de As, se observó un tiempo de equilibrio de aproximadamente 0.5 h para Q1Fe, mientras que para Q2Fe el tiempo de equilibrio se alcanzó a las 4 h (Fig. 1b).

Los valores de As residual disminuyeron debajo del límite establecido por la Pcia. de Bs As a las 2 y 4 h para Q1Fe y Q2Fe, respectivamente (Fig. 1.c). A partir de los errores calculados para los modelos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden se observó que la cinética de

adsorción de As se ajustó adecuadamente al modelo de pseudo-segundo orden para matrices Q1Fe y Q2Fe (Tabla 2). El modelo pseudo-segundo orden representó la cinética de adsorción de As en adsorbentes de quitosano/arcilla/magnetita (Cho et al., 2012) y en otros adsorbentes de bajo costo como mazorca de maíz, desechos de té, cáscara de huevo (Shakoor et al.,2019).

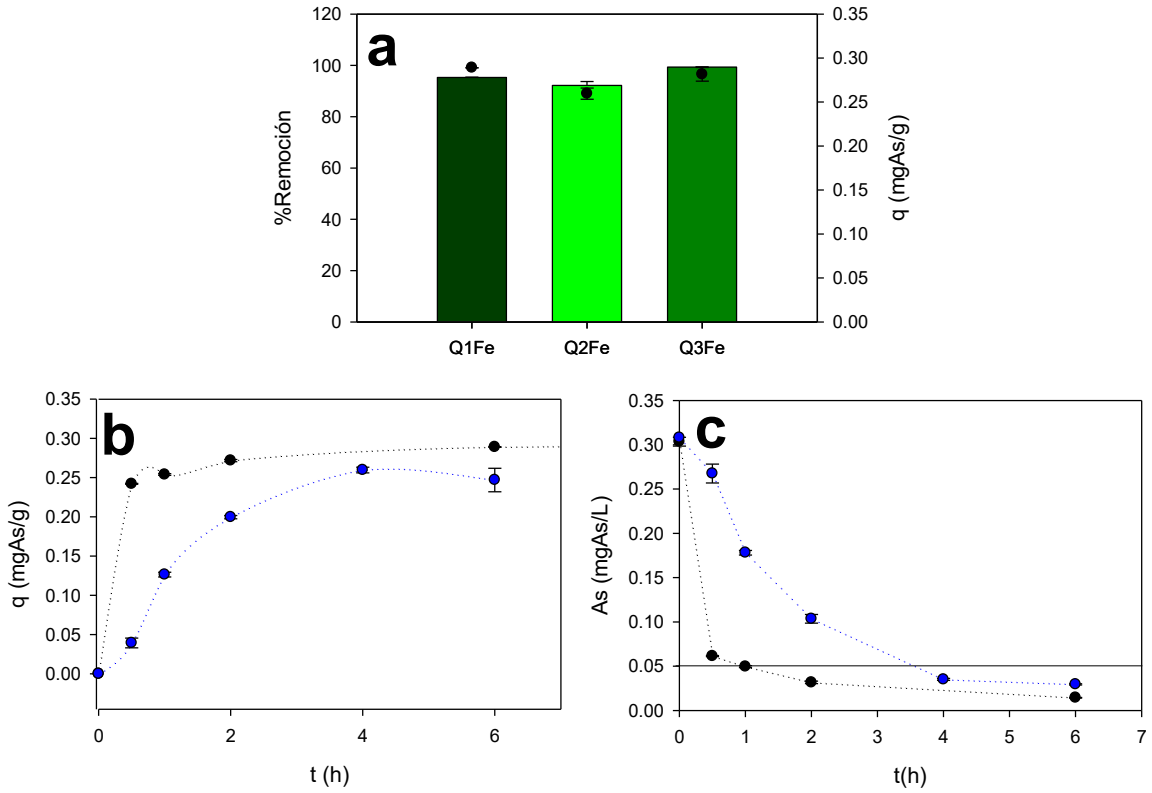


Figura 1.a. Capacidad de adsorción (•) y % de remoción de Arsénico (barras) en matrices de quitosano con hierro, tiempo de contacto 6 h. **b.** Capacidad de adsorción de As en función del tiempo para (•) Q1Fe y (•) Q2Fe. **c.** Concentración remanente de As en agua en el tiempo para (•) Q1Fe y (•) Q2Fe. La línea indica el límite de 0.05 mgAs/L. Condiciones: pH 5.2, temperatura 30°C, dosis de matrices con hierro 0.7%p/p 1 g/L, concentración inicial de Arsénico 0.3 mg/L.

Tabla 2. Parámetros cinéticos, coeficiente de determinación (r^2), suma de errores al cuadrado (SSE) y error relativo promedio (ARE) para la adsorción de 0.3 mg/L de As a 30°C, pH 5.20.

Pseudo-primer orden	**q_e (mg/g)**	**q_p(mg/g)**	**K1**	**r^2**	**SSE**	**ARE**
Q1Fe	0.290±0.003	0.063	0.135	0.588	0.748	93.760
Q2Fe	0.240±0.015	0.208	0.454	0.921	0.033	63.120
Pseudo-segundo orden	**q_e (mg/g)**	**q_p(mg/g)**	**K2**	**r^2**	**SSE**	**ARE**
Q1Fe	0.290±0.003	0.298	4.233	0.999	0.060	20.430
Q2Fe	0.240±0.015	0.305	0.870	0.900	0.008	21.840

Remoción de F en matrices de quitosano con Ca. La Fig.2.a muestra que los % Remoción de F fueron 72.7±3.6%, 61.8±1.1% y 49.7±5.6% para Q1Ca, Q2Ca y Q3Ca, respectivamente. Asimismo, la capacidad de adsorción (q) fue de 0.700±0.040 mgF/g, 0.580±0.007mgF/g y 0.470±0.050 mgF/g para Q1Ca, Q2Ca y Q3Ca, respectivamente. La mayor capacidad de adsorción en este caso se logró con la matriz Q1Ca sintetizada con

quitosano de peso molecular medio y menor grado de desacetilación. A diferencia de los resultados obtenidos para As, en la adsorción de F, utilizando matrices de quitosano funcionalizadas con fosfato de calcio no se observaron los mismos efectos del peso molecular del quitosano en la capacidad de adsorción.
Se seleccionaron las matrices Q1Ca y Q2Ca para evaluar la cinética de remoción de F (Fig.2.b). El tiempo de equilibrio para Q1Ca y Q2Ca se obtuvo a las 4 h aproximadamente con valores de F remanentes de 2.45 mgF/L y 3.85 mgF/L, respectivamente (Fig.2.c). Los resultados obtenidos de cinética de adsorción se evaluaron con los modelos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden. En base a los cálculos de SSE y ARE los datos de adsorción de F en matrices Q1Ca y Q2Ca se ajustaron adecuadamente el modelo pseudo-segundo orden (Tabla 3). Valdez-Alegría et al. (2020), trabajaron con perlas de hidrogel de quitosano-alcohol polivinílico reticulado e informaron valores de q similares a los obtenidos en este estudio, con una cinética de adsorción se ajustó al modelo pseudo-segundo orden.

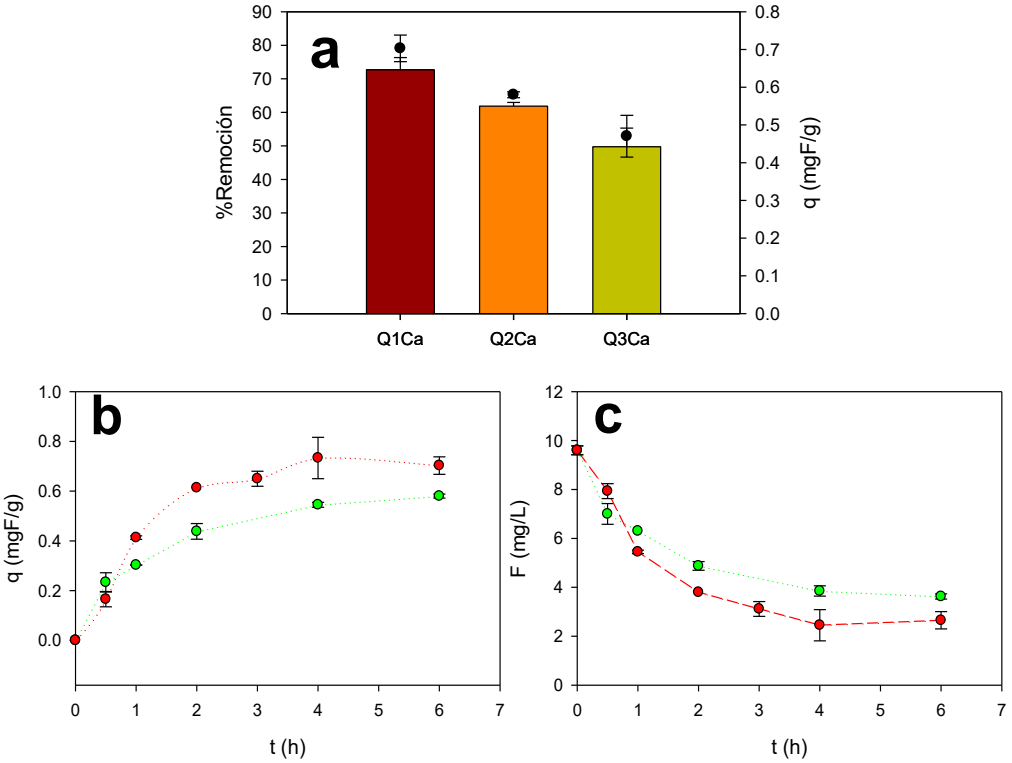


Figura 2. a. Capacidad de adsorción (•) y % de remoción de Flúor (barras) en matrices de quitosano con Calcio 0.7 p/p, tiempo de contacto 6. **b**. Capacidad de adsorción de F en función del tiempo para (•) Q1Ca y (•) Q2Ca. **c**. Concentración remanente de F en agua en el tiempo para (•) Q1Ca y (•) Q2Ca. Condiciones: pH 5.2, temperatura 30°C, dosis de matrices con Calcio 0.7%p/p 10 g/L, concentración inicial de Flúor 9.6 mg/L.

Tabla 3. Parámetros cinéticos, coeficiente de determinación (r^2), suma de errores al cuadrado (SSE) y error relativo promedio (ARE) para la adsorción de 9.6 mg/L de F a 30°C, pH 5.20.

Pseudo- primer orden	**q_e (mg/g)**	**q_p(mg/g)**	**K1**	**r^2**	**SSE**	**ARE**
Q1Ca	0.700±0.04	1.450	1.090	0.650	8.920	137.190
Q2Ca	0.580±0.007	0.470	0.580	0.970	0.060	15.240
Pseudo-segundo orden	**q_e (mg/g)**	**qp(mg/g)**	**K2**	**r^2**	**SSE**	**ARE**
Q1Ca	0.700±0,035	0.800	1.970	0.980	0.750	14.460
Q2Ca	0.580±0.008	0.690	1.270	0.990	0.005	4.910

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la síntesis por gelificación ionotrópica de matrices de quitosano funcionalizadas con Fe y Ca, para la remoción de As y F, respectivamente. La remoción de As fue levemente superior en matrices funcionalizadas con Fe con quitosanos de peso molecular medio (Q1 y Q3) evidenciando un efecto del peso molecular sobre la adsorción. En los ensayos de adsorción de As con las matrices funcionalizadas con Fe se logró reducir la concentración de As a valores inferiores a la norma establecida en Pcia. Bs As para agua de consumo.
En la remoción de F en las matrices de quitosano con Ca se obtuvo una remoción superior al 70% en Q1 (Sigma) y levemente inferior para Q2Ca y Q3Ca. Los resultados de adsorción de F no indicaron un efecto del peso molecular de quitosano utilizado en la síntesis de las matrices funcionalizadas con Ca. Las cinéticas de adsorción se ajustaron adecuadamente al modelo pseudo-segundo orden tanto para As como para F en Q1Fe y Q2Fe, y en Q1Ca y Q2Ca, respectivamente. Por lo tanto, la revalorización de residuos para sintetizar adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas puede constituir un método sustentable para la remoción de As y F en aguas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cho, D.-W., Jeon, B.-H., Chon, C.-M., Kim, Y., Schwartz, F. W., Lee, E.-S., & Song, H. (2012). A novel chitosan/clay/magnetite composite for adsorption of Cu (II) and As (V). *Chemical Engineering Journal, 200*, 654-662. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.126

da Silva Alves DC, Healy B, Pinto LAA, Cadaval TRS Jr, Breslin CB. (2021). Recent Developments in Chitosan-Based Adsorbents for the Removal of Pollutants from Aqueous Environments. Molecules. Jan 23;26(3):594. doi: 10.3390/molecules26030594. PMID: 33498661; PMCID: PMC7866017.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal, 156*(1), 2-10. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013

Guibal, E., Vincent, T., & Navarro, R. (2014). Metal ion biosorption on chitosan for the synthesis of advanced materials. Journal of Materials Science, 49, 5505-5518. doi:10.1007/s10853-014-8301-5

Lenoble, V., Deluchat, V., Serpaud, B., & Bollinger, J. C. (2003). Arsenite oxidation and arsenate determination by the molybdene blue method. *Talanta, 61*(3), 267-276. doi:10.1016/s0039-9140(03)00274-1

Lobo, C., Castellari, J., Colman Lerner, J., Bertola, N., & Zaritzky, N. (2020). Functional iron chitosan microspheres synthesized by ionotropic gelation for the removal of arsenic (V) from water. *International Journal of Biological Macromolecules, 164*, 1575-1583. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.253

Saha, T. K., Karmaker, S., Ichikawa, H., & Fukumori, Y. (2005). Mechanisms and kinetics of trisodium 2-hydroxy-1, 1′-azonaphthalene-3, 4′, 6-trisulfonate adsorption onto chitosan. Journal of colloid and interface science, 286(2), 433-439. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.037

Scheverin, V. N., Horst, M. F., & Lassalle, V. L. (2022). Novel hydroxyapatite-biomass nanocomposites for fluoride adsorption. *Results in Engineering, 16*, 100648. doi:https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100648

Shakoor, M. B., Niazi, N. K., Bibi, I., Shahid, M., Saqib, Z. A., Nawaz, M. F., Bundschuh, J. (2019). Exploring the arsenic removal potential of various biosorbents from water. *Environment International, 123*, 567-579. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.049

Valdez-Alegría, C. J., Fuentes-Rivas, R. M., García-Rivas, J. L., Zavala Arce, R. E., Jiménez Núñez, M. d. l. L., & García-Gaitán, B. (2020). Synthesis of Chitosan-Polyvinyl Alcohol Biopolymers to Eliminate Fluorides from Water. *10*(1), 156. https://doi.org/10.3390/biom10010156

Younis, A., A Aly-Eldeen, M., & M Elkady, E. (2019). Effect of different molecular weights of chitosan on the removal efficiencies of heavy metals from contaminated water. Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries, 23(4), 149-158. DOI: 10.21608/ejabf.2019.52591

EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SU APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS SOSTENIBLES DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Torres, María Gimena; Lorenzo, Gabriel; García Colli, Germán

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 1 y 47. CP. 1900. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
gimena.torres@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una preocupación creciente respecto de los problemas ambientales, siendo los principales el cambio climático, la degradación del ambiente y el agotamiento de los recursos naturales. La performance ambiental de un producto o proceso se ha vuelto clave para analizar alternativas que minimicen los efectos en el ambiente (1). Esta tendencia ha llevado a la inclusión de métodos de análisis adicionales a los tradicionales para evaluar la sostenibilidad de proyectos y productos. Dentro de estas técnicas, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se está adoptando de forma creciente (2).

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis integral de las distintas fases de la técnica de ACV, complementado con ejemplos tomados de los estudios realizados por el grupo en diversos sistemas de interés. Los sistemas de estudio se clasificaron en dos grupos. El primero dentro de la industria alimentaria abarcó: el ACV comparativo entre un yogur bebible y una bebida láctea larga vida; el ACV de la carne vacuna; el ACV de porotos (var. *Phaseolus vulgaris*) y el ACV comparativo del reemplazo de carne vacuna por harinas de porotos de diferentes calidades nutricionales en matrices cárnicas híbridas.

Dentro del segundo grupo, se determinó la huella de carbono (HC) comparativa del transporte de gas natural vía gasoducto versus el transporte marítimo como gas natural licuado (GNL) desde Argentina hacia Brasil.

METODOLOGÍA

El ACV es una técnica metodológica con base científica que permite cuantificar todos los consumos de recursos y todas las emisiones asociadas a un producto, proceso o servicio (en adelante el producto), en un alcance denominado “desde la cuna hasta la tumba” (3). De esta manera, el ciclo de vida se inicia con la extracción de las materias primas desde el ambiente (suelo, aire, agua) para crear un producto y termina cuando todos los materiales retornan al ambiente (suelo, aire, agua). Es decir, que incluye las fases de: fabricación, transporte y distribución; uso y mantenimiento; y tratamiento y/o manejo de los residuos producidos para la disposición final. En la Figura 1 se muestra, a modo de ejemplo, el ciclo de vida del poroto producido en el noroeste argentino y el consumo del grano.

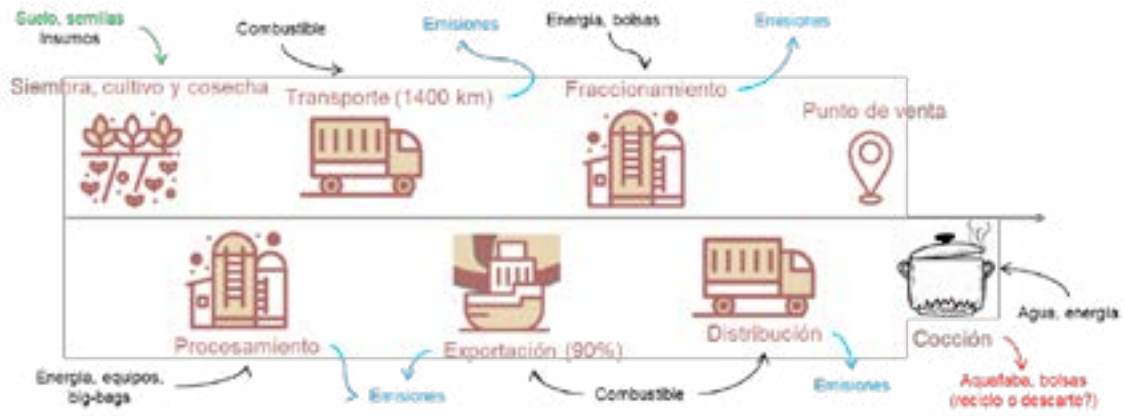


Figura 1 Ciclo de vida del poroto

Una vez establecidos los consumos y emisiones, la técnica ordena los potenciales impactos ambientales en un número de indicadores asociados a la afectación del ambiente, la explotación de los recursos naturales y a la afectación en la salud humana.
La técnica se rige por las normas IRAM-ISO 14040:2023 (4) e IRAM-ISO 14044:2008 (5) y comprende cuatro fases obligatorias: 1. La definición del objetivo y alcance; 2. El inventario; 3. La evaluación de impactos; y 4. La interpretación de los resultados. Sus resultados son de aplicación para: la identificación de mejoras de un producto y/o sus fases del ciclo, la selección de indicadores de desempeño, la planificación estratégica, las declaraciones ambientales de producto; y el marketing (3, 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Definición del objetivo y alcance

Establecer el objetivo implica determinar qué producto se va a estudiar, las razones y el público al que se dirige. El alcance incluye definir: el sistema de producto y sus límites, la unidad funcional, el tipo de asignación, los criterios de corte y las categorías de impacto a evaluar (4).
Acerca de la definición del producto, en la mayoría de los casos interesa cuantificar aisladamente uno en particular. También se puede optar por comparar más de un producto con la misma función, o varios procesos alternativos para obtener el mismo producto. A estos casos se los denomina ACV comparativos. De esta manera, se han elaborado los siguientes ACV: el análisis comparativo entre una bebida láctea larga vida y un yogur bebible, y el análisis comparativo de la producción de carne vacuna bajo dos estrategias de alimentación: con pasturas extensivas o con pasturas suplementadas con alimento concentrado.
Respecto a los límites del sistema, además de optar por el estudio del ciclo de vida completo, se puede definir límites de menor extensión denominados: “de la cuna a la puerta”, “de la puerta a la tumba” o “de la puerta a la puerta” (5). El alcance estricto de la “cuna a la tumba” debe corresponder a un sistema de producto en el cual sus entradas y salidas sean flujos elementales (materias primas y emisiones, respectivamente). Para el análisis comparativo de bebida láctea y yogur bebible, como el proceso de elaboración comparte etapas, los sistemas de producto se conformaron sólo con aquéllas que difieren: la ultrapasteurización y transporte sin refrigeración para la bebida láctea y el transporte refrigerado para el yogur bebible, como se muestra en la Figura 2. En el caso del ACV de la carne vacuna, el sistema de producto se conformó tanto por las etapas de campo: cría e invernada, más las etapas de industrialización y comercialización del producto: faena, frigorífico y carnicerías. En la evaluación de la HC del gas natural se evaluó únicamente la fase de transporte y la etapa de operación.

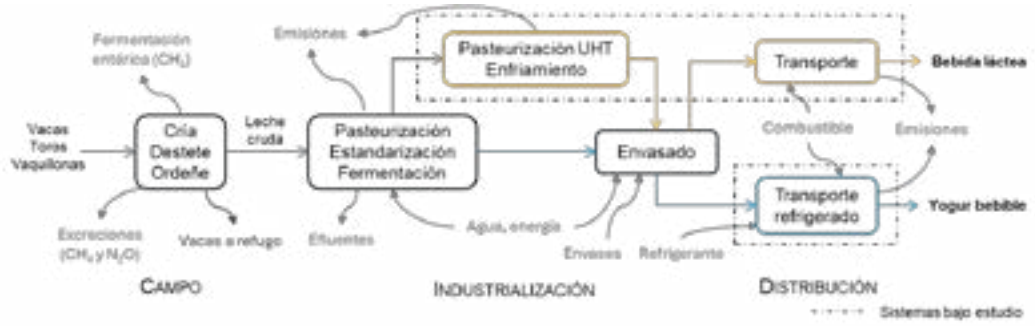


Figura 2 Alcance del ACV comparativo del yogur bebible versus la bebida láctea larga vida.

La unidad funcional (UF) es la cantidad de producto para la cual se van a calcular todos los flujos de entrada y salida. Puede expresarse en unidades de masa, volumen, energía o cantidades discretas (por ejemplo, un empaque para 4 hamburguesas). En la Tabla 1 se presentan los valores adoptados de UF y alcance de los sistemas estudiados.

Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)
Esta etapa involucra la recopilación de los datos de todas las unidades de procesos involucradas en el alcance y concernientes a los consumos de materias primas, insumos y energía para la elaboración de productos, coproductos y/o subproductos, y la generación de residuos y efluentes. Para cada unidad, se deben realizar balances tomando como referencia la UF para obtener un balance global con las cantidades antedichas en la entrada y la salida del sistema. A partir de este cálculo se determinan los denominados flujos de referencia que constituyen la tabla de inventarios.

Tabla 1 Alcance y UF de los proyectos evaluados

Tema	Alcance	Unidad funcional
Bebida láctea (1) vs. Yogur (2)	(1) Pasteurización UHT – Transporte (2) Transporte refrigerado	1 litro de bebida
Carne vacuna	Desde la cuna a la carnicería	1 kg carne de venta
Harina de porotos	Desde la cuna a la preparación	1 kg harina
Gas Natural vs. GNL	Desde la planta de tratamiento (ARG) hasta el punto de derivación (BR)	1 MMSm3 de gas natural

Los datos se clasifican en datos primarios, aquellos que son internos a la unidad de proceso evaluada, y secundarios, los asociados a las unidades de procesos de cantidades producidas o enviadas desde o hacia un proceso externo al sistema de producto (por ejemplo: consumos de energía o insumos suministrados externamente) (3). En términos de calidad, se debe garantizar que se trate de datos reales y fehacientes de una fuente confiable y referenciada. Pueden reflejar el proceso de una unidad productiva específica, de un grupo de éstas o el comportamiento estadístico de una variable en un conjunto regional de unidades de procesos. Para los datos primarios se deben considerar datos compilados o extraídos por el desarrollador del ICV. En el caso del ACV de carne vacuna, se realizó una compilación de datos estadísticos que reflejan los rendimientos y consumos promedio de Argentina a partir de bibliografía específica, datos públicos del sector, entre otros. Para el caso de la HC del gas natural se consultaron los reportes de sustentabilidad de las empresas encargadas de la operación y mantenimiento de los gasoductos involucrados. Para el caso de la producción de porotos los datos fueron suministrados por el INTA EEA Salta.
En el caso de los datos secundarios, se cuenta con bases de datos nacionales e internacionales que compilan los inventarios de gran número de industrias estratégicas. La base de datos más importante a la fecha es *Ecoinvent* que compila datos de alcance global de un gran número de sectores productivos y *Agrifootprint* que compila datos globales de agricultura y de la industria de alimentos. Entre otras bases de datos regionales y nacionales se destacan: *LCA Commons* que provee datos representativos de USA, *Agribalyse* una base de datos francesa sobre agricultura y alimentos y *ELCD* una base europea de múltiples procesos actualizada hasta el año 2018.
La asignación de cargas se realiza cuando a partir de un proceso se obtiene tanto el producto de interés como otros productos, subproductos o efluentes que se tratan o reciclan. Las materias primas y las emisiones asociadas se deben repartir con algún criterio lógico entre todas las salidas. Los criterios más usuales son de masa, volumen o económicos. En el caso de la carne vacuna, en la etapa de cría se realizó una asignación biofísica de las emisiones de las vacas, vaquillonas y toros al novillo producido que es el único producto de la fase. Para la etapa de faena se realizó una asignación másica entre los subproductos que se obtienen además de la res: el cuero, grasa y sebo, menudencias y vísceras, y huesos.
Por otro lado, también se suele acotar el universo de datos y de procesos con un criterio de corte para evitar aumentar innecesariamente el volumen de datos a procesar. Los criterios más comunes son los de masa y energía limitando las entradas por ejemplo a las contribuciones que aportan más del 1% del total requerido. También puede adoptarse un criterio de corte en base a las emisiones.
En la Tabla 2 se muestra como ejemplo un extracto del inventario producido para la fase de siembra, cultivo y cosecha del poroto.

Evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV)

Tabla 2

	Unidad	Valor		Unidad	Valor
Salidas					
De la tecnosfera			**Emisiones al aire**		
*Herbicidas**					
*Insecticidas**					
*Fungicidas**			**Emisiones al agua**		
Combustible máquinas y equipos	*lt*				
Uso de maquinaria	*s*		**Emisiones al suelo**		
Del ambiente					

$$Valor\ del\ impacto\ (categoría) = \sum_i ICV_i \times FC_i$$

Donde i son todos los compuestos emitidos determinados en el ICV con incidencia en la categoría evaluada.
En la Tabla 3 se muestran los resultados de la HC comparativa para el transporte de gas natural expresada en ton CO_2 eq/MMSm^3 gas natural.
Las metodologías de caracterización de impactos se encuentran ampliamente desarrolladas y son de libre disponibilidad. Las metodologías multi-categorías son: TRACI (6), ReCiPe (7), Impact World+ (8) y las categorías de las Declaraciones Ambientales de Producto (9). Otras categorías de impacto único disponibles son: el protocolo del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) de ONU (10) para el calentamiento global, *UseTox* (11) para la toxicidad y la huella hídrica o la huella de agua (3).

Tabla 3 Huella de carbono en ton CO_2 eq/MMSm^3 para el transporte de gas natural vía gasoducto y vía marítima (como GNL) desde Neuquén (ARG) hasta San Pablo (BR) en la fase operativa

Medio de transporte	Gas natural	GNL
Gasoducto	82.8	
Turbina de vapor		369.6
Motor de 4 tiempos		373.2
Motor de 2 tiempos*		351.9
Fuel oil*		374.5
Promedio buques		366

* valores promedio para un rango de temperatura ambiente entre 5 y 25 °C.

Para evitar errores de determinación asociados al gran volumen de datos y cálculos que requiere el método se han desarrollado softwares en los que se pueden cargar los ICV desarrollados, las bases de datos externas y los métodos de caracterización de impactos. El más conocido y de uso libre es el *openLCA*®, mientras que, dentro de los licenciados se encuentran: *Simapro*®, *Humberto*® y *Gabi*®.
En la Figura 3 se presentan resultados de la EICV de carne vacuna en dos formatos típicos: a la izquierda la contribución de los procesos a cada categoría, y a la derecha los resultados de un ACV comparativo.

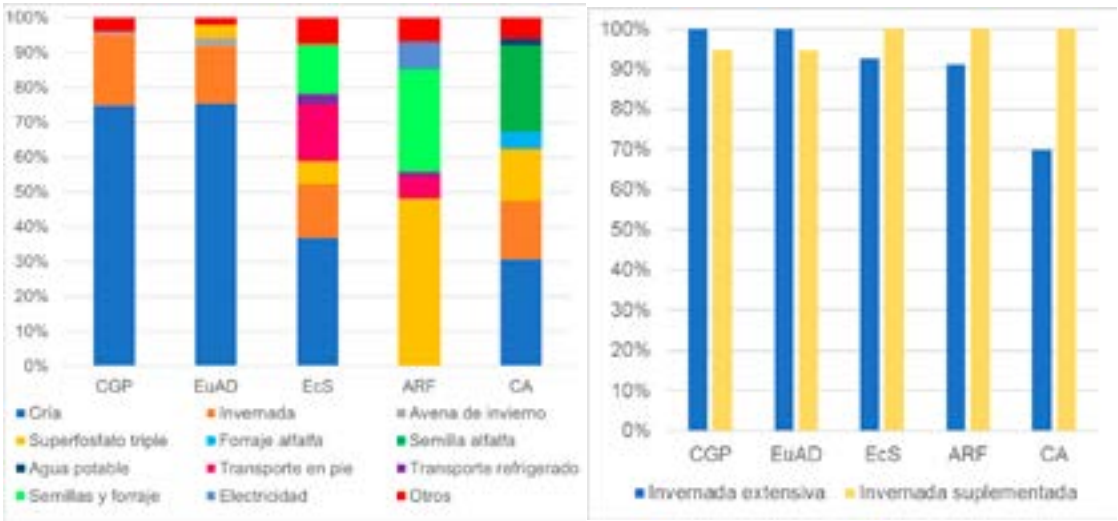


Figura 3 EICV de la carne vacuna. Caracterización mediante ReCiPe Midpoint (H). Izq. Contribución de las etapas de proceso en la invernada extensiva. Der. Análisis comparativo de los impactos para la producción de carne vacuna (relativos al máximo). CGP: Calentamiento Global Potencial, EuAD: Eutrofización del Agua Dulce, EcS: Ecotoxicidad del Suelo, ARF: Agotamiento de los Recursos Fósiles, CA: Consumo de Agua.

Interpretación del ciclo de vida

A partir del análisis crítico de los resultados, se pueden obtener conclusiones y/o hallazgos para determinar cuáles son las fases de proceso y/o actividades que más contribuyen a una o más categorías de impacto; si la calidad de los datos genera valores confiables; y en última instancia recomendar modificaciones al diseño del sistema de producto que disminuyan los impactos potenciales obtenidos (5).
En el caso del ACV comparativo de la bebida láctea con yogur se detectó que es mucho mayor el peso en los impactos que genera el transporte refrigerado en el yogur que la contribución de la etapa de ultrapasteurización en la bebida láctea.
En el caso del ACV comparativo de la carne vacuna, una alimentación extensiva si bien genera mayor Calentamiento Global Potencial respecto de la alimentación suplementada, otras categorías de impacto de carácter regional como la ecotoxicidad y la acidificación del suelo disminuyen (Fig 3). Por otro lado, del ICV se determinó el alto peso relativo que tienen las fases de cría e industrialización en el rendimiento final de la carne de venta y por ende en las emisiones asociadas.
El ACV de harina de porotos generó valores sensiblemente altos en la categoría de Agotamiento de los Recursos Fósiles debido al alto consumo energético de la fase de producción de la harina, lo que motivó a iniciar una revisión exhaustiva de la determinación de los datos de inventario asociados.
La evaluación del transporte de gas natural evidenció un aumento significativo de la HC empleando el transporte del gas licuado por vía marítima (Tabla 3).

CONCLUSIONES

La aplicación de la técnica demostró la importancia de evaluar múltiples categorías de impacto para caracterizar correctamente el perfil ambiental, ya que la evaluación de una categoría aislada puede llevar a una interpretación errónea o incompleta del mismo (12). Si bien es correcto afirmar que la cría de ganado con alimentación suplementada o a corral genera una HC menor que la actividad a pasturas extensiva, se determinó que otros impactos destacables de alcance regional son mayores. Por otro lado, también se observó la importancia de la definición apropiada de los límites de alcance del sistema. Una incorrecta selección puede resultar en la subestimación de los impactos del ciclo de vida. Tal es el caso de no considerar las fases de industrialización de la carne vacuna en el alcance del inventario o las fases de producción de la harina en el ciclo de vida de la harina de porotos. La evaluación de las distancias de transporte también resultó un parámetro sensible a la hora de evaluar los impactos como se identificó en el caso del yogur refrigerado respecto de la bebida que no requiere refrigeración, o en el caso del transporte del GNL donde a cortas distancias la HC de la licuefacción y traslado marítimo son mucho mayores que las del transporte vía gasoducto.
Finalmente, si bien la técnica no determina una condición absoluta de la huella ambiental, permite determinar qué impactos son mayores comparativamente frente a un diseño o rediseño de un producto o proceso, siendo para el evaluador una herramienta valiosa para seleccionar una opción en relación con el desempeño ambiental y los objetivos particulares perseguidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Life Cycle Assessment: Principles and Practices.* Environmental Protection Agency of USA (EPA), 2006.
2. Klemes, J. J., *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*, Elsevier, Oxford. 2015).
3. Arena, AP. Guía de estudio: *Análisis de ciclo de vida y huellas ambientales* del curso de posgrado: “Fundamentos y Aplicaciones actuales del Análisis del Ciclo de Vida desde Huellas Ambientales hasta Declaraciones Ambientales de Producto”. 2023.
4. IRAM-ISO 14040:2023. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

5. IRAM-ISO 14044:2008. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
6. Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI), EPA. Disponible: https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci
7. RIVM, the Dutch National Institute for Public Health and the Environment. Disponible: https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads
8. International Reference Center for Life Cycle Assessment and Sustainable Transition (CIRAIG), Technical University of Denmark. Disponible: https://www.impactworldplus.org/version-2-1/
9. Environmental performance indicators. The International EPD System. Disponible: https://www.environdec.com/indicators
10. Perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. ONU. 2019
11. The USEtox Model. ONU – SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry). Disponible: https://usetox.org/model/download
12. Sadhukhan J, et al, Perspectives on “Game Changer” Global Challenges for Sustainable 21st Century: Plant-Based Diet, Unavoidable Food Waste Biorefining, and Circular Economy. Sustainability, 2020, 12, 1976. https://doi.org/10.3390/su12051976

CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE UNA EMPRESA RECUPERADORA DE PLÁSTICOS

Orsetti Santiago; Perez; Federico M.; Santori Gerardo; Pompeo Francisco; Gatti, Martín N.*

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP.
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA) - Laboratorio Calle 50 Nº 184, 1900, La Plata, Argentina.

*e mail: martin.gatti@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Se entiende al fenómeno del calentamiento global como la elevación de la temperatura promedio en la Tierra debido al desarrollo de las actividades antropógenas. Este proceso está fuertemente relacionado con el efecto invernadero, proceso en el cual la atmósfera terrestre actúa como una barrera frente a la radiación electromagnética. Así, cuando una fracción de los rayos del sol (constituidos por los espectros ultravioleta y visible) atraviesan la atmósfera y son absorbidos por la superficie terrestre, los gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO_2), el ozono (O_3), el metano (CH_4) y el vapor de agua evitan que parte de ellos escapen al exterior, produciéndose una acumulación de energía que se traduce en un aumento de la temperatura ambiente. Como resultado de las actividades humanas, la concentración de estos gases, denominados *gases de efecto invernadero* (GEI) se ha incrementado, y su sobreacumulación ha llevado a profundizar el efecto invernadero y, en consecuencia, el calentamiento global, constituyéndose como una de las problemáticas más grandes al que se enfrenta el mundo actual. En respuesta a esto, han surgido iniciativas internacionales, nacionales y locales, implementadas tanto por el sector público y privado, para estabilizar las concentraciones de GEI y mitigar el cambio climático. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue la primera de todas ellas y se creó en mayo de 1992 para concientizar públicamente los problemas ocasionados por el cambio climático. El protocolo de Kioto, creado en diciembre de 1997 por la CMNUCC y puesto en vigor en febrero de 2005, fue un tratado internacional firmado por varios países que acordaron reducir sus emisiones de CO_2, CH_4, óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) en un 5% respecto de los niveles de 1990. Desde entonces, hubo un creciente interés en la disminución de la “huella de carbono”, un nuevo concepto que refleja las emisiones de GEI producidas por una organización, un evento o un producto. Para el año 2018, 192 los países ya se habían alineado al acuerdo [1]. Argentina ha formado parte del Protocolo desde el año 2016 e impulsó la reducción de las emisiones de GEI mediante la Ley Nacional 27.270.

En este contexto, la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) creó la familia de normas ISO 14.060 para que las organizaciones puedan cuantificar, monitorear, reportar y validar sus emisiones de GEI basándose en cinco principios fundamentales [2]:

- Pertinencia: sea cual sea la metodología y los datos seleccionados, debe asegurarse que el inventario de GEI refleje apropiadamente las emisiones de la empresa y que sea útil para que los usuarios puedan tomar decisiones.
- Integridad: se debe incluir todas las emisiones y remociones de GEI, incluso si son despreciables.
- Consistencia: la metodología de cálculo propuesta debe ser la misma para cada uno de los informes hechos en distintos años, de tal manera de que la información pueda ser comparable en el tiempo.
- Precisión: se debe minimizar la incertidumbre y el sesgo.

- Transparencia: la información debe ser registrada y analizada de forma tal de que permita a los usuarios, supervisores internos y verificadores externos autentificar la credibilidad y reproducibilidad del informe.

En particular, la norma ISO 14.064-1 se centra en el diseño y desarrollo del inventario de GEI de una organización, la cual fija los requerimientos para establecer los límites de emisiones de GEI, cuantificar las emisiones de GEI de la organización e identificar las actividades o acciones específicas de la compañía con el objetivo de mejorar la gestión de los GEI.
Amiplast S.A. es una organización fundada en el 2006 que se dedica al reciclado de polipropileno y de polietileno de alta y baja densidad que son recuperados del sector industrial, comercial, agrícola y post consumo. Desde entonces, ha contribuido a la economía circular, reduciendo la contaminación de los espacios verdes, vertederos y rellenos sanitarios que generan dichos plásticos.
En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo la descripción del proceso de cuantificación de la huella de carbono para la empresa Amiplast S. A., y comparar los resultados obtenidos con las emisiones producidas por empresas que producen plástico virgen.

Metodología

De acuerdo con la norma ISO 14.064-1, se requiere definir un periodo en el que se realiza el cálculo de la huella de carbono, con una duración de hasta un año. La norma también aconseja definir un periodo anterior de misma duración llamado “año base”, a fines comparativos [2]. El periodo de estudio fue seleccionado por la organización y se ubica entre el 1 de abril del 2022 y el 31 de marzo del 2023. En cuanto al año base, se eligió el año anterior, comprendido entre el 1 de abril del 2021 y el 31 de marzo del 2022.

Tabla 1. Clasificación de las emisiones por categorías, propuesta por la norma ISO 14064-1.

Categoría	Título	Resumen
C1	Emisiones y remociones directas de GEI	Cubre todas las emisiones y remociones directas de GEI generadas dentro de los límites operacionales de la empresa.
C2	Emisiones indirectas de GEI por importación de la energía	Comprende todas las emisiones indirectas por el uso de la energía dentro de los límites de la empresa.
C3	Emisiones indirectas de GEI por transporte	Contempla las emisiones generadas por el transporte de bienes y personas fuera de los límites organizacionales, cualquiera sea el tipo de vehículo (ferrocarril, marítimo, aéreo y rodado).
C4	Emisiones indirectas de GEI por uso de bienes y prestaciones	Comprende a todas las emisiones indirectas por el uso de productos comprados a otra organización y servicios distintos a las energías importadas.
C5	Emisiones indirectas de GEI asociadas al uso del producto de la organización	Se trata de todas las emisiones que resultan de los usos que los clientes les dan a los productos/servicios que ofrece la empresa bajo estudio.
C6	Otras emisiones de GEI	Cualquier emisión que no haya sido contemplada en las categorías anteriores.

Para calcular el inventario de GEI y reportar las emisiones de Amiplast S. A. se adoptó el enfoque de control operativo, en el cual la empresa toma control del 100 % de las emisiones o remociones. En cuanto al alcance del reporte, la **Tabla 1** presenta un resumen de la clasificación por categorías para las fuentes y remociones de emisión que propone el anexo B de la norma ISO 14.064-1. La contabilización de las emisiones de GEI para cada categoría puede variar dependiendo de los límites organizacionales establecidos. Para el caso de Amiplast S.A., las categorías 1, 2 y 3 resultaron suficientes para clasificar a todas las emisiones identificadas.
Las emisiones de GEI se determinaron de forma indirecta multiplicando el dato de cada actividad por un factor de emisión, de acuerdo con la **Ecuación 1**.

$$E_{GEI} = A \cdot FE_{GEI} \quad (1)$$

En la Ecuación 1, A representa el dato de actividad, es decir, la medida cuantitativa de una actividad que emite o remueve GEI, por ejemplo, distancias recorridas por los trabajadores, cantidad utilizada de un combustible, etc. Por su parte, FE_{GEI} es el factor de emisión, el cual representa el equivalente de un GEI por unidad de actividad. Todos los FE utilizados en el informe se calcularon como el promedio de valores extraídos de dos bases de datos: IPCC 2006 y DEFRA UK 2020 [3,4]. Finalmente, E_{GEI} es la masa de un GEI que fue emitida a la atmósfera como resultado de la actividad. En este trabajo, las emisiones se expresan en unidades de Kg o Ton de CO_2, CH_4, N_2O, u otro GEI.
Una vez calculada cada una de las emisiones de GEI, éstas se expresaron en masa de CO_2 equivalentes empleando la **Ecuación 2**, ya que cada GEI tiene un potencial de calentamiento global (en inglés, Global Warming Potential o GWP) cuyo valor indica el potencial daño desde el punto de vista del calentamiento global.

$$E_{CO2eq} = GWP_{GEI} \cdot E_{GEI} \quad (2)$$

En esta última ecuación, GWP_{GEI} es un índice que mide la fuerza de radiación de una unidad de masa de un GEI dado en la atmósfera actual integrado en un periodo determinado, relativo al CO_2. Por ejemplo, el CH_4 presenta 28 veces el GWP del CO_2 [4]. Por su parte, E_{CO2eq} es la masa equivalente de CO_2 que representa una cierta masa de GEI emitida o removida producto de una actividad. Estas emisiones se expresan en Kg CO_2 Eq o Ton CO_2 Eq.

Resultados y discusión

La **Tabla 2** muestra las toneladas de CO_2 equivalentes emitidas por Amiplast S.A. para el año base y el periodo 2022-2023.
De acuerdo con la **Tabla 2**, la mayor emisión se debió al consumo de electricidad de la categoría 2. Esto era de esperarse ya que todo el proceso de reciclado del plástico requiere de electricidad para mover maquinaria pesada como extrusoras, trituradoras, estrujadoras, lavadoras y secadoras. Las oficinas no contribuyeron demasiado en las emisiones, por lo que todas las emisiones se ven concentradas en el proceso productivo.

Tabla 2. Inventario de GEI de Amiplast S.A. para los dos periodos estudiados.

Categoría	Subcategoría	Fuente de emisión	Emisiones 2021-2022	Emisiones 2022-2023
C1	Combustibles fuentes móviles	Gasoil Sampi	21,37	21,37
	Sistemas antropogénicos	Matafuegos HCFC 123	2,39	2,39
	Emisiones equivalentes en C1 (Ton CO_2 Eq)		**23,76**	**23,76**
C2	Energía importada	Consumo eléctrico	889,61	988,96
	Emisiones equivalentes en C2 (Ton CO_2 Eq)		**889,61**	**988,96**
C3	Transporte aguas arriba	Camiones cargados	506,85	506,85
		Camiones vacíos	130,29	130,29
	Transporte aguas abajo	Camiones cargados	64,79	64,79
		Camiones vacíos	16,66	16,66
	Transporte del personal	Transporte en bicicleta	0,00	0,00
		Transporte en motocicleta	20,33	20,33
		Transporte en automóvil	33,94	33,94
		Transporte en autobús	9,19	9,19
	Visitas recibidas	Transporte en motocicleta	0,02	0,02
		Transporte en automóvil	0,24	0,24
		Transporte en van	0,00	0,00
		Transporte en autobús	0,02	0,02
	Viaje a terceros	Transporte en automóvil	0,49	0,49
		Transporte en avión	0,22	0,22
	Emisiones equivalentes en C3 (Ton CO_2 Eq)		**783,04**	**783,04**
Emisiones equivalentes TOTALES (Ton CO_2 Eq)			**1.696,43**	**1.795,76**

En la **Figura 1a** se muestra la composición de la huella de carbono por categoría en el periodo 2022-2023 y en las **Figuras 1b** y **1c** la distribución de las emisiones para las Categorías 1 y 3, respectivamente. Se omitió el gráfico para la Categoría 2 porque el consumo de la electricidad representa el 100% de sus emisiones.

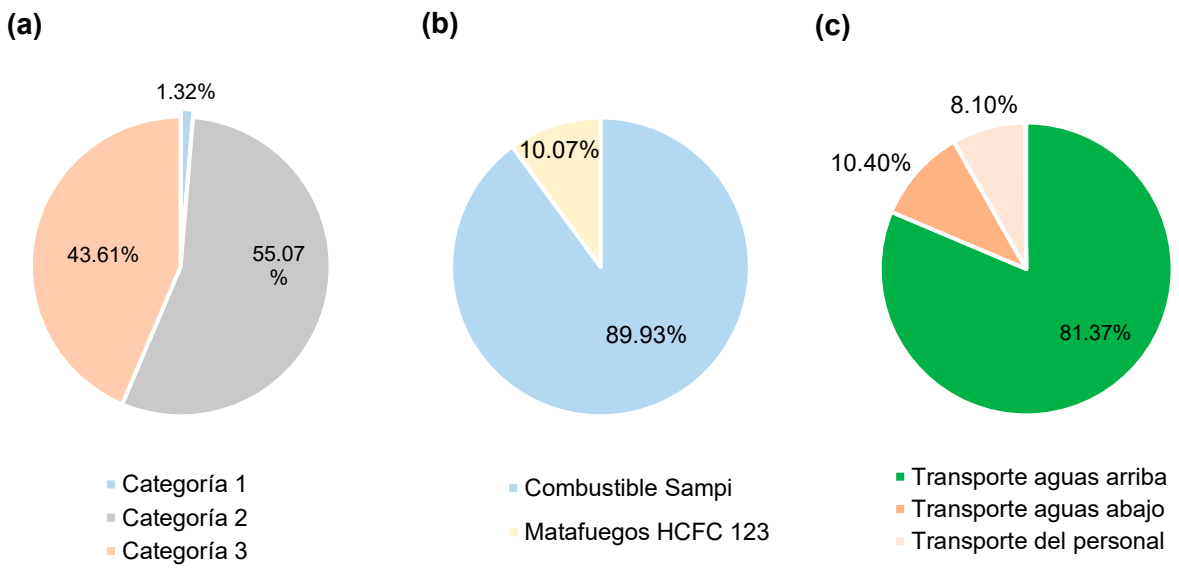


Figura 1. (a) Porcentaje representativo de las emisiones para cada categoría en el periodo 2022-2023 (b) Porcentaje representativo de las emisiones para cada fuente de la categoría 1 para ese mismo periodo (c) Porcentaje representativo de las emisiones para cada fuente de la categoría 3 para ese mismo periodo; el 0,13% restante corresponde a visitas recibidas y viajes a terceros.

De acuerdo con la **Figura 1a**, en el caso de la Categoría 1, las emisiones de CO_2 equivalentes fueron casi 24 toneladas, representando el 1% del total. Las cantidades emitidas pertenecientes a la Categoría 2 fueron de 989 toneladas, lo que equivale a un 55% del total de la huella de carbono de ese año. Finalmente, la categoría 3 fue responsable de haber emitido 783 toneladas de CO_2 equivalentes, lo que representó el 44% de las emisiones totales. Por su parte, como se observa en la **Figura 1b**, las emisiones generadas por el combustible destinado a los autoelevadores (sampi), representó casi el 90% de dicha categoría, correspondiendo el 10% restante al uso de los matafuegos.

Finalmente, la **Figura 1c** muestra la distribución de emisiones para la categoría 3. Allí se observa que el transporte de materias primas fue el más predominante de las cinco subcategorías, representando el 81%, seguido por el transporte de producto con un 10% del total de emisiones en esta categoría. El destino del producto fue Capital Federal en todos los casos. De los dos tipos de transportes, el viaje de ida (transporte de aguas arriba) resultó en un mayor nivel de emisión debido a la carga de los camiones.

Con respecto al transporte del personal desde su residencia hasta la planta, las emisiones por transporte en auto representan un 53,45% de las emisiones totales, mientras que las emisiones por transporte en motocicleta representan un 32,04% de las emisiones totales. Esto se explica porque las motocicletas presentan un menor factor de emisión, al ser vehículos de menor porte comparado con los autos. Los autobuses generaron una menor emisión de GEI debido a que la cantidad de trabajadores que usan este medio de transporte es menor, representando un 14,48% de las emisiones totales por transporte. Las emisiones por visitas recibidas y viajes a terceros son despreciables frente a las otras subcategorías.

Según información reportada por distintos autores, la síntesis de polipropileno (PP) a partir de materia prima virgen libera numerosos contaminantes a la atmósfera, con emisiones totales informadas de 1,34 [5], 1,58 [6], 1,63 [7] y 1,95 [8] Kg CO_2Eq/Kg Producto. También, según el historial de emisiones del polietileno de alta densidad (PEAD), los valores reportados van desde los 1,48 [5] hasta los 1,70 [11] Kg CO2Eq/Kg Producto. Del polietileno de baja densidad (PEBD) se encontraron valores cercanos a los del polietileno de alta densidad [5]. La empresa

Amiplast S.A. produjo alrededor de 6.690 toneladas de producto reciclado en el período 2022-2023, y el cálculo de la emisión total resultó en 1.795,76 Ton CO_2Eq dando como resultado una emisión de 0,27 Kg CO_2Eq/Kg Producto. Esto comprueba que la producción de plásticos a partir de la recuperación y el reciclado de plásticos usados genera un impacto medioambiental positivo desde el punto de vista de la huella de carbono, ya que satisface el mercado de plásticos (específicamente PP, PEAD y PEBD) con productos 6 veces menos nocivos comparados con los que ofrece la industria petroquímica.

Conclusiones

En este trabajo se reportaron los resultados del cálculo de la huella de carbono de Amiplast S.A. usando la norma ISO 14.064-1. Para ello se establecieron los límites organizacionales y el periodo de estudio, se identificaron y categorizaron las fuentes de emisiones según propone la norma, y se calcularon las emisiones por medio de factores de emisión, los cuales fueron extraídos de bases de datos confiables. El inventario de GEI en el periodo 2022-2023 consiste en unas 1.800 toneladas de CO_2 equivalentes, de las cuales un 55% pertenece a las emisiones indirectas por consumo eléctrico, casi el 44% fueron producidas por las emisiones indirectas por transporte, y el restante 1% se debió a las emisiones directas. Cuando se calculó las emisiones generadas por unidad de plástico producido, se obtuvieron 0,27 Kg CO_2Eq/Kg Producto, que resulta un número seis veces menor a los que se conocen para la industria del polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (PEBD) y polietileno de alta densidad (PEAD). Los resultados del informe indican que las emisiones de GEI por parte de la empresa Amiplast S.A. son bajas en comparación a las obtenidas por empresas petroquímicas que elaboran plástico virgen y por lo tanto las actividades desarrolladas por Amiplast S.A. contribuyen a la reducción, recuperación y reciclaje de residuos plásticos y promueven el desarrollo sostenible.

Bibliografía

[1] Matthews J.B.R. et al. (2018). IPCC, 2018: Anexo I: Glosario.
[2] International Organization for Standardization (ISO) (2018). Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (ISO 14064-1).
[3] Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) (2017). Emission Factors from Cross-Sector Tools. Disponible en:
https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance.
[4] Department for Environment Food and Rural Affairs from United Kingdom (DEFRA UK). (2020). UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. 1.0 version. Disponible en:
https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting.
[5] Green, J. (2011). Life Cycle Assessment of Reusable and Single-use Plastic Bags in California.
[6] Alsabri, A., Tahir, F. & Al-Ghamdi, S.G. (2021). Life-Cycle Assessment of Polypropylene Production in the Gulf Cooperation Council (GCC) Region. Polymers 2021, 13, 3793. Disponible en: https://doi.org/10.3390/polym13213793.
[7] Fröhlich, T., Liebich, A. & Volz, S. Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers - Polypropylene (PP). Plastics Europe.
[8] Gulf Petrochemicals and Chemicals Association (2018). Eco-Profile of Polyolefins (HDPE and PP) in the GCC. Disponible en: https://www.ifeu.de/en/project/oekoprofil-von-polyolefinen-aus-laendern-des-mittleren-ostens/.

PROPUESTA DE UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN PINTURAS Y TERMOPLÁSTICOS

Weimer, Iván[1,2]*; Byrne, Christian[1,3]; Cerruti, Claudio[1,4]

[1] Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT), CIC-CONICET- Facultad de Ingeniería-UNLP, Av. 52 e/ 121 y 122, La Plata, Argentina
[2] Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina
[3] Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, La Plata, Argentina
[4] Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina

*i.weimer@cidepint.ing.unlp.edu.ar

Introducción

Una pintura está constituida por la dispersión de una mezcla de sólidos finamente divididos (pigmentos) en un medio fluido denominado vehículo, que incluye resinas y solventes. Las resinas son el material formador de película, los solventes regulan la viscosidad y hacen posible la aplicación de la pintura, mientras que los pigmentos confieren a la pintura propiedades específicas tales como opacidad, dureza, resistencia a la radiación ultravioleta y a los agentes químicos, capacidad anticorrosiva, etc. Las pinturas termoplásticas son un recubrimiento que se utiliza para demarcación vial. Se componen de resinas y pigmentos y en algunos casos microesferas de vidrio que brindan propiedades reflectantes. Su aplicación se basa en un proceso de fusión y fluidización que elimina la necesidad de solventes.
Los pigmentos opacantes son aquellos que tienen un índice de refracción mayor que el de las resinas utilizadas, lo que provoca que la luz que penetra en la película pigmentada sea refractada varias veces antes de alcanzar el sustrato. El pigmento blanco por excelencia utilizado por la industria de las pinturas es el dióxido de titanio (TiO_2). Gracias a su alto índice de refracción, la capacidad de dispersión de la luz del TiO_2 es superior a la de otros pigmentos blancos, lo que le confiere un excelente poder cubritivo. Este pigmento ofrece además brillo y duración, debido a su protección contra la luz ultravioleta y su dureza, lo que incide en la calidad del recubrimiento.
La determinación del contenido de TiO_2 en pinturas es necesaria tanto para control de calidad como para optimizar el rendimiento del producto en la etapa de investigación y desarrollo. Este estudio requiere de métodos analíticos específicos adaptados a la naturaleza compleja de la muestra. Para pigmentos y cargas inorgánicas, la norma IRAM 1405/1967 establece un método volumétrico basado en una valoración redox, donde el Ti(IV) se reduce con aluminio metálico y luego se titulan los iones Ti(III) (con una solución de cloruro férrico, utilizando tiocianato de potasio como indicador. Por otro lado, para pinturas al agua tipo emulsión, con una matriz más compleja, la norma IRAM 1109-A18/1981 describe un método gravimétrico que consiste en la evaporación y calcinación de la muestra para eliminar el material orgánico, seguido por la disolución del residuo con ácido clorhídrico y la precipitación del dióxido de titanio con solución de amoníaco. En general, la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP OES), la espectrometría de masas (ICP-MS) y la fluorescencia de rayos X (XRF) son alternativas para la determinación de Ti [1, 2]. No obstante, el costo de adquisición y mantenimiento de estos equipos es demasiado alto para su implementación en los laboratorios analíticos. Los procedimientos espectrofotométricos, en cambio, requieren instrumentación de menor costo, pero la determinación de Ti se suele llevar a cabo con reactivos selectivos, como el ponceau S o 4'-dimetilfenilazo-6-hidroxipirimidina-2,4-diona [1]. Estos productos químicos por un lado pueden mostrar elevada toxicidad, y por otro hacen que los procedimientos sean costosos. Por lo tanto, es necesario buscar reactivos selectivos y de bajo costo para la determinación de Ti. El peróxido de hidrógeno es un reactivo colorimétrico que cumple con esta condición, siendo más barato, más fácil de adquirir y más fácil de descartar que los reactivos orgánicos

utilizados habitualmente [1]. En este sentido, el presente trabajo propone un método alternativo para la determinación de TiO_2 en pinturas, que comprende en primer lugar un pretratamiento que incluye la calcinación de la muestra y la disolución posterior de las cenizas en bisulfato de potasio fundido, seguido del análisis espectrofotométrico cuantitativo del complejo coloreado formado por la reacción del Ti(IV) con peróxido de hidrógeno en medio sulfúrico.
Al reaccionar con peróxido de hidrógeno a un pH por debajo de 1, el Ti(IV) forma un complejo mononuclear con un anión peróxido por ion de titanio [1, 3]. El complejo mononuclear ha sido caracterizado por espectroscopia infrarroja, y los datos sugieren una estructura similar a la mostrada en la Figura 1, donde un dianión de peróxido se quela al centro de titanio [3].

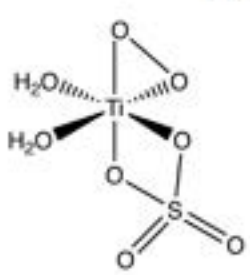


Fig. 1. Estructura sugerida del complejo mononuclear, con un dianión de peróxido quelado a un centro de titanio

La complejación del peróxido por Ti(IV) da lugar a una banda de transferencia de carga de ligando a metal cercana a 405-410 nm, que le otorga al complejo su característico color anaranjado intenso [3]. Dado que esta banda de transferencia de carga específica sólo puede formarse con la complejación del peróxido, la formación del color es extremadamente selectiva [3]. Además, la formación del color no se debe a un proceso redox. Por lo tanto, el reactivo no responde a otros oxidantes fuertes como el ozono o el dióxido de nitrógeno [3]. Asimismo, la reacción es irreversible, lo que permite una medición robusta del color final mediante determinaciones espectrofotométricas. En conjunto, la selectividad, estabilidad y el color intenso final de los complejos de titanio(IV)-peróxido resultantes son las principales razones por las cuales esta reacción puede utilizarse para la detección espectrofotométrica de Ti(IV) en soluciones.

Parte experimental

Pretratamiento de la muestra

El pretratamiento de la muestra de pintura o material termoplástico involucra:
a) Calentamiento de las muestras de pintura hasta evaporación total del solvente.
b) Carbonización de la muestra de pintura seca o muestra de termoplástico, seguida de calcinación en mufla a 650°C hasta la eliminación de la materia orgánica.
c) Disgregación del residuo (cenizas) con bisulfato de potasio fundido.
d) Disolución del disgregado con solución de ácido sulfúrico, seguida de filtración.
e) Reacción de formación de complejo coloreado mediante adición de peróxido de hidrógeno.

Determinación espectrofotométrica

Con el fin de localizar el máximo de absorción del complejo se realizó un espectro de absorción de una solución estándar conteniendo 100 ppm de TiO_2. Las medidas se

registraron entre 190 a 750 nm a intervalos de 1 nm, utilizando un espectrofotómetro Shimadzu UV-2600 y celdas de cuarzo de 1 cm.
Por otro lado, se determinó una curva de calibración mediante la medición de la absorbancia (a la longitud de onda correspondiente al máximo de absorción) de soluciones estándar de TiO_2 con concentraciones de 25, 50, 100, 150 y 200 ppm. Este rango de concentraciones resulta adecuado para los contenidos de titanio presentes habitualmente en pinturas y termoplásticos. Asimismo, el rango contiene la concentración correspondiente al valor de corte establecido por la Norma IRAM 1211 aplicable a termoplásticos.

Evaluación de la precisión de las medidas espectrofotométricas: carta de control

Con el objetivo de evaluar la precisión y realizar un seguimiento del componente espectrofotométrico de la técnica, se construyó una carta de control utilizando mediciones de absorbancia de una solución estándar de TiO_2 con una concentración de 100 ppm.

Evaluación de la reproducibilidad

Se efectuaron mediciones por duplicado en muestras de termoplásticos y películas de pintura seca, abarcando diversos rangos de concentración.

Evaluación de la exactitud: ensayos interlaboratorio

Con el fin de evaluar la exactitud de la técnica, se realizó la determinación de concentración en muestras de termoplásticos a tres niveles, dentro de un ensayo interlaboratorio organizado por el IRAM.

Resultados y discusión

Determinación espectrofotométrica

El espectro de absorción obtenido para una solución estándar conteniendo 100 ppm de TiO_2 se representa en la Fig. 2. Se comprobó la presencia de un máximo de absorción a 407 nm.

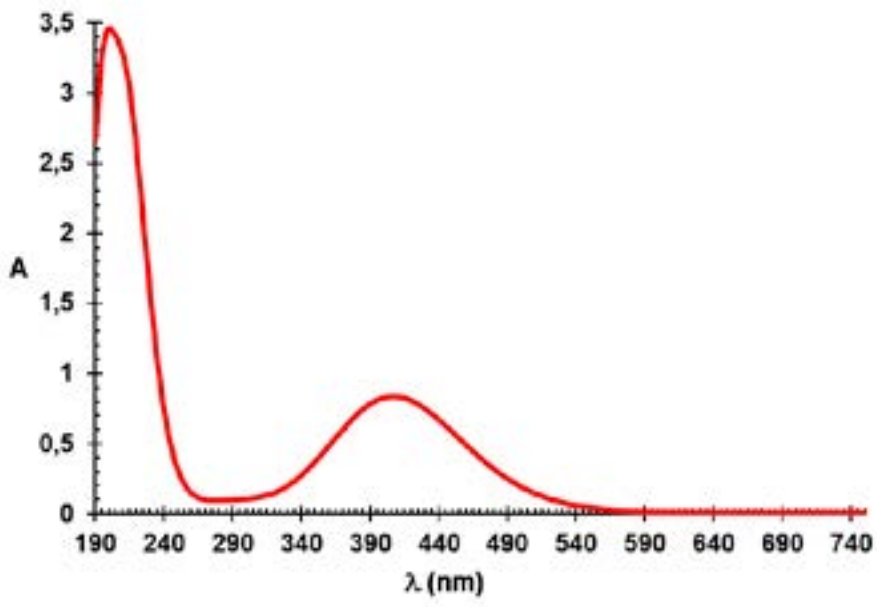


Fig. 2. Espectro correspondiente al complejo formado entre Ti(IV) y peróxido.

La curva de calibración obtenida se puede observar en la Fig. 3. Se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0,999985, lo que indica una correlación lineal positiva fuerte entre dos variables.

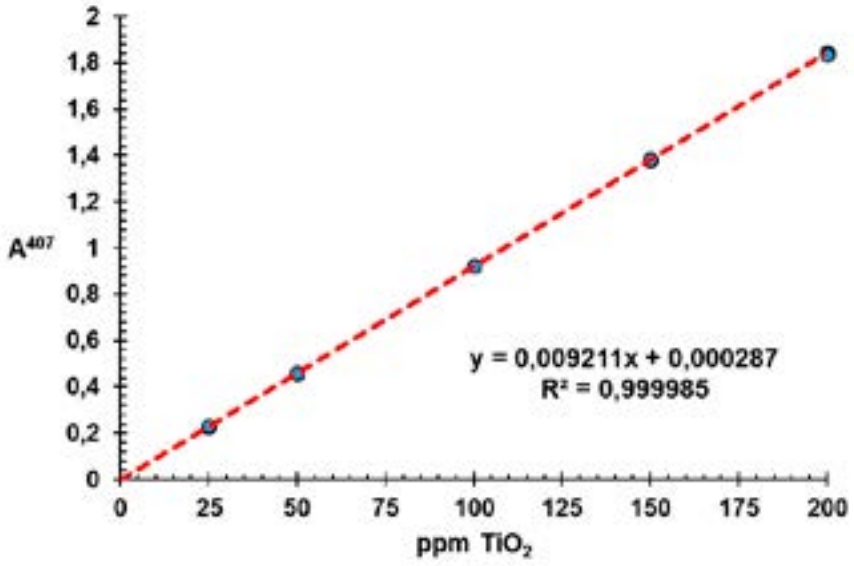


Fig. 3. Curva de calibración en donde se representa la absorbancia a 407 nm para soluciones de concentración conocida de TiO_2.

Evaluación de la precisión de las medidas espectrofotométricas: carta de control

En la Fig. 4, se puede observar la carta de control construída. La desviación estándar obtenida fue de 0,411.

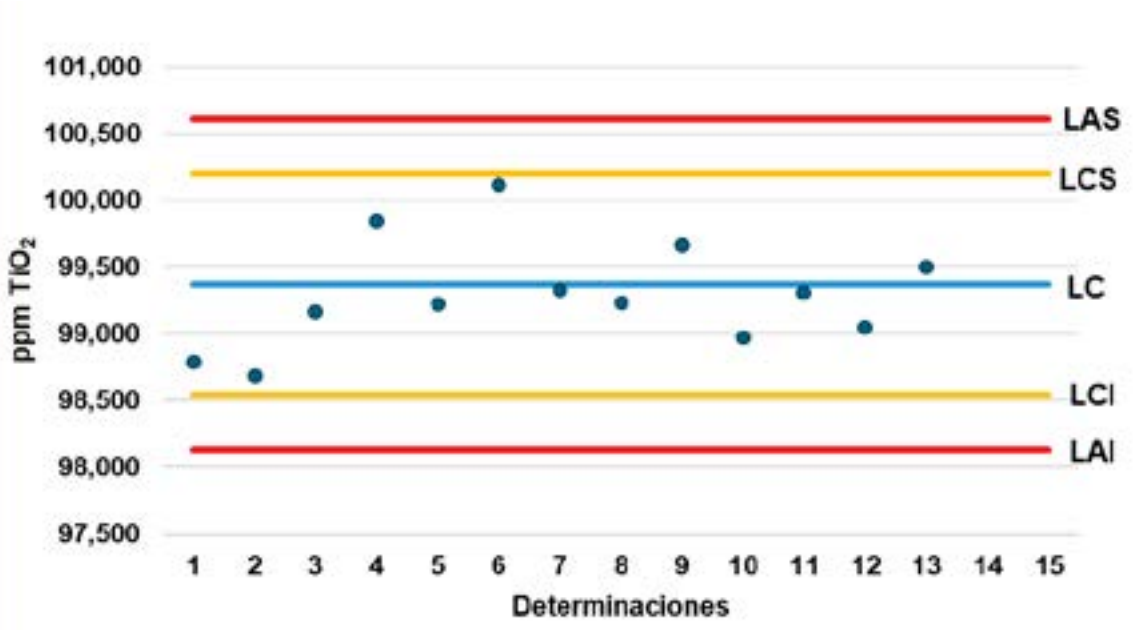


Fig. 4. Carta de control para una solución estándar 100 ppm de TiO_2. LC: línea central, LAS: línea de acción superior, LAI: línea de acción inferior, LCS:línea de control superior, LCI:línea de control inferior.

Evaluación de la reproducibilidad del método

Los valores obtenidos para las muestras medidas por duplicado se muestran en la Fig. 5. Se puede observar la baja dispersión entre los valores obtenidos para cada muestra.

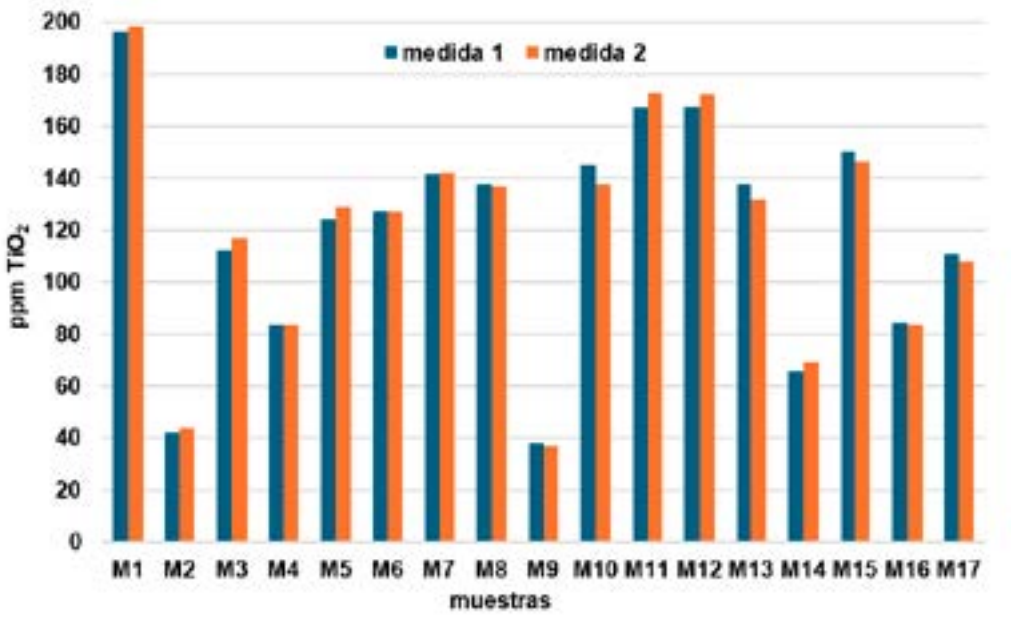


Fig. 5. Comparación entre duplicados de distintas muestras.

Evaluación de la exactitud: ensayos interlaboratorio

Los resultados obtenidos por los distintos laboratorios se resumen en la Tabla 1. En el caso del método de reducción con aluminio, se puede observar que los resultados dependen bastante del laboratorio que los realiza, lo que podría estar relacionado con lo complicado que resulta ese procedimiento. Por otro lado, el método gravimétrico, el análisis espectrométrico de fluorescencia de rayos X y el método espectrofotométrico propuesto presentan valores que se aproximan bastante a los valores aceptados para cada nivel. En el caso del método espectrofotométrico, estas diferencias oscilan entre el 3 y 7 %.

Tabla 1. Análisis interlaboratorio para la determinación de TiO_2 en productos termoplásticos para demarcación vial horizontal. Valores promedio en %p/p.

Muestra	Valor teórico (aceptado)	IRAM 1405 (reducción con aluminio)				Método gravimétrico	XRF	Método espectrofotométrico Complejo entre Ti(IV) y peróxido (CIDEPINT)
		L1	L2	L3	L4			
M1	6,3	6,7	7,1	8,0	7,0	6,5	6,8	6,5
M2	9,0	9,1	10,8	11,4	9,2	9,2	9,7	8,8
M3	11,7	11,8	12,0	14,0	11,2	10,5	12,0	11,1

Conclusiones

Según el método propuesto, la cuantificación de TiO_2 se lleva a cabo mediante mediciones espectrofotométricas, garantizando precisión, exactitud y aplicabilidad en entornos industriales, siendo adecuado para laboratorios de control de calidad y centros de investigación. Esto ofrece una opción atractiva y sencilla frente a la reducción con aluminio, que implica un procedimiento engorroso, la precipitación con amoníaco, que es laboriosa y susceptible a interferencias, y también frente a otros métodos alternativos como XPS o ICP, que involucran el empleo de equipamiento específico de alto costo.

Bibliografía

[1] Librandi Rocha, D., Reis, F.E., & Maringolo, V. (2019). Fast and simple spectrophotometric procedure for determination of TiO2 in paint samples. Brazilian Journal of Analytical Chemistry, 6(22), 52-59. https://doi.org/10.30744/brjac.2179-3425.AR.131-2018
[2] ASTM D4764-01 (2016) Standard Test Method for Determination by X-ray Fluorescence Spectroscopy of Titanium Dioxide Content in Paint. https://doi.org/10.1520/D4764-01R16
[3] Hossain, R., Dickinson, J. J., Apblett, A., & Materer, N. F. (2022). Detection of Hydrogen Peroxide in Liquid and Vapors Using Titanium(IV)-Based Test Strips and Low-Cost Hardware. Sensors, 22(17), 6635. https://doi.org/10.3390/s22176635

CONTRASTE ENTRE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EXTERIOR DE BANCOS DE TUBOS CON ALETAS CONTINUAS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA CON MEDIDAS EXPERIMENTALES

Suarez Felipe J. [1]*, Barreto Guillermo F. [1], Mariani Néstor J. [1,2]

[1]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina
[2]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA) CONICET- CIC – UNLP Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina
*e-mail: felipe.suarez@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: simulación numérica, tubos con aletas continuas, coeficientes de transferencia de calor

1. Introducción

Los intercambiadores de tubos con aletas continuas son extensamente utilizados en una variedad de aplicaciones de intercambio térmico gas-liquido entre las que pueden incluirse: condensadores y evaporadores en equipos de acondicionamiento de aire, enfriadores de agua y de aceite en vehículos de transporte y carga, aero-enfriadores/condensadores en industrias de procesos y de generación de energía eléctrica.
Dada la importancia de este tipo de dispositivos, y la dificultad que presenta la estimación de su comportamiento termo-hidráulico en el lado exterior de los tubos, distintos autores han ensayado experimentalmente y publicado resultados para un amplio rango de velocidades de gas. Sin embargo, el costo de construir y medir experimentalmente un intercambiador de este tipo en un túnel de viento hace que en la bibliografía se encuentren resultados solo para un rango acotado de pasos transversales y longitudinales entre tubos. Simultáneamente, es frecuente encontrar resultados dispares al comparar ensayos realizados en condiciones similares.
Por otro lado, las plataformas de simulación numérica constituyen una herramienta extensamente utilizada para estudiar el comportamiento de sistemas de intercambio térmico, incluido el caso de intercambiadores de tubos con aletas continuas. Al respecto existe una amplia bibliografía donde se reportan resultados de simulaciones por CFD y se los compara con medidas experimentales de coeficientes de transferencia de calor. La comparación de los resultados no es siempre satisfactoria, dando cuenta del desafío que representa el uso de esta herramienta para estudiar este tipo de dispositivos.
En este trabajo se presentan resultados de simulaciones CFD realizadas en la plataforma Comsol Multiphysics que reproducen numéricamente las condiciones fluidodinámicas en las distintas configuraciones geométricas ensayadas por diferentes autores [1-4]. Estos valores se contrastan con los resultados experimentales extractados de los distintos trabajos y a partir de esta comparación se analiza la capacidad de predicción de la velocidad de transferencia de calor en el exterior de los tubos, a la vez que se discuten, las limitaciones a la hora de replicar resultados obtenidos experimentalmente.

2. Modelo

En la figura 1 se muestra el esquema del lado externo de un banco de tubos con aletas continuas de dos columnas de tubos (nc=2) con arreglo escalonado y se indican las dimensiones utilizadas para la construcción de los dominios para las simulaciones. Estos dominios son dos: la aleta (dominio sólido) en el cual se resolverá la ecuación de conservación de energía involucrando la transferencia de calor por conducción, y el espacio entre aletas (dominio fluido) en el cual se resolverán, en forma simultánea, las ecuaciones de balance de conservación de la energía y de cantidad de movimiento. Los planos "x_i" en las figuras (con i=0, nc) son planos transversales a la dirección del flujo

(x) que separan las “celdas unitarias” (n_j con j=1, nc), entre la entrada y la salida del dominio (x_e y x_s). En los planos x_i se evaluarán los valores promedio de las velocidades, presiones y temperaturas para obtener los coeficientes peliculares y de perdida de carga en cada celda.

Aprovechando los planos de simetría que presenta la geometría se puede reducir el dominio a utilizar en las simulaciones a una cuarta parte del dominio de una celda. El dominio utilizado en para las simulaciones es el que se indica sombreada en la Fig. 1.

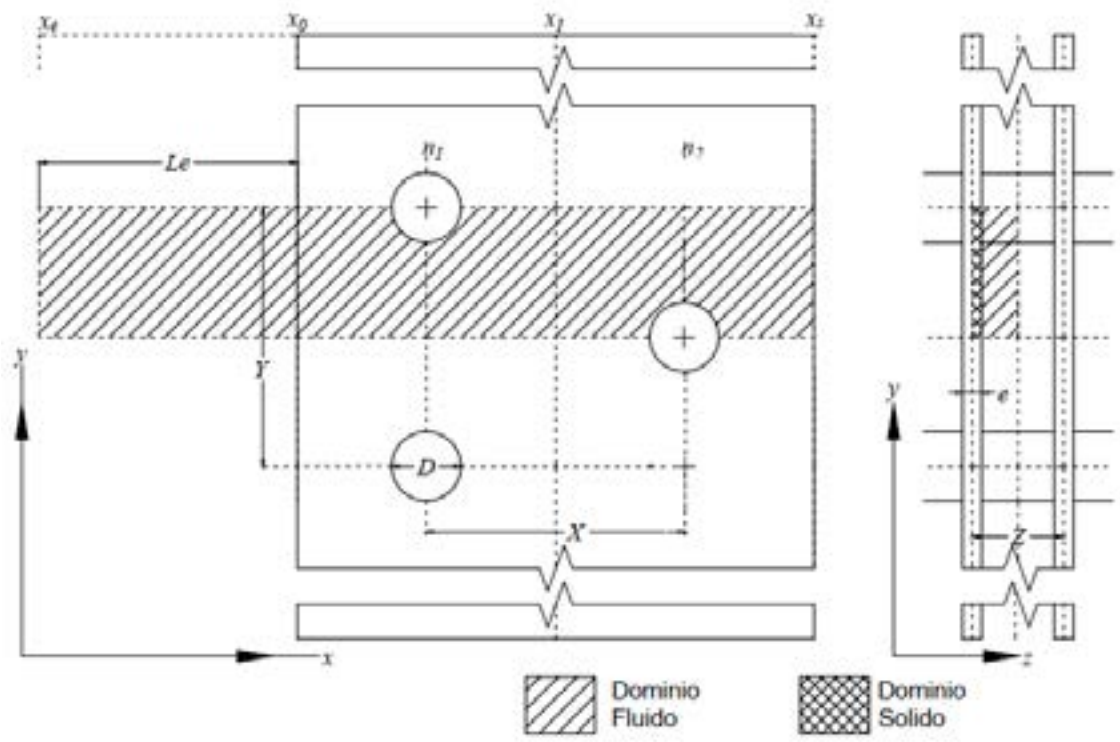


Figura 1. Esquema geométrico del intercambiador de calor

Para facilitar la comparación entre geometrías se definen parámetros geométricos reducidos: paso longitudinal (Px), paso transversal (Py), separación de aletas (Pz) y espesor reducido (f)

$$Px = \frac{X}{D} \quad ; \quad Py = \frac{Y}{D} \quad ; \quad Pz = \frac{Z}{D} \quad ; \quad f = \frac{e}{D}$$

El modelado y resolución se realizó en la plataforma de elementos finitos Comsol Multiphysics, utilizando los módulos de transferencia de calor en sólidos y en fluidos y el módulo fluidodinámico para flujo incompresible en régimen laminar estacionario, cuyas expresiones se transcriben:

Ecuaciones de transferencia de calor:

$$\rho C_p u \nabla T + \nabla q = 0 \; ; \qquad q = -k \nabla T$$

Ecuaciones de continuidad y balance de cantidad de movimiento:

$$\rho \nabla (u) = 0 \quad ; \quad \rho (u \cdot \nabla) u + = \nabla \cdot [\rho I + K] \quad ; \quad K = \mu \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right)$$

En la figura 2 se muestra el dominio mallado en el programa para el caso de cuatro columnas de tubos (nc=4). En la misma se muestran las distintas condiciones de borde utilizadas en el modelo.

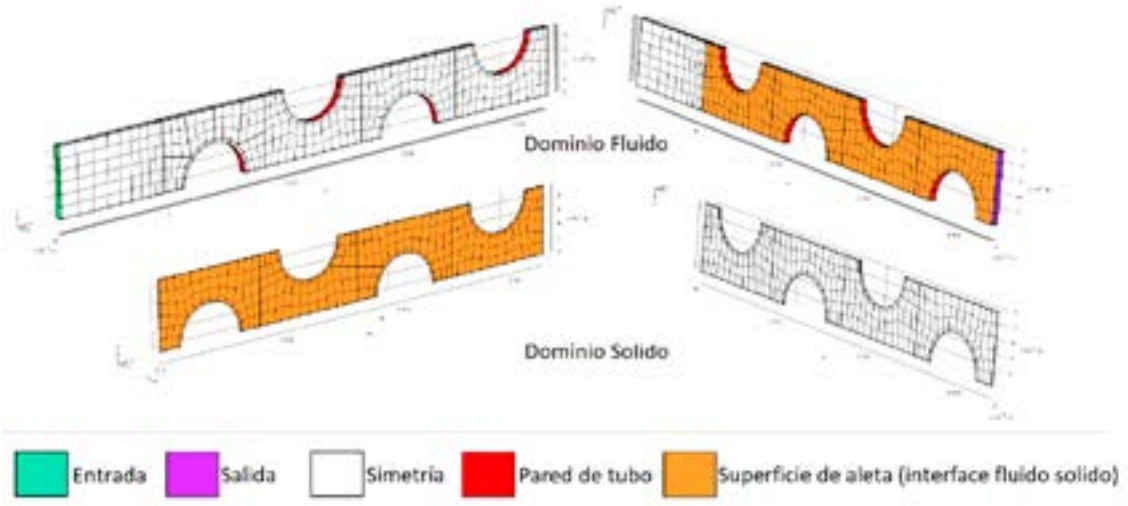


Figura 2. Dominio mallado en Comsol Multiphysiscs

En la Tabla 1 se describe la condición que aplica en cada una de las condiciones de borde.

Dada la geometría de los dominios resulta directo implementar una malla estructurada a partir de elementos hexaédricos, esto posibilita usar una menor cantidad de elementos para discretizar el dominio adecuadamente, a la vez que, permite tener un buen control de la distribución de elementos sobre las superficies del dominio fluido donde se forma la capa límite térmica y fluidodinámica.

Tabla 1. Condiciones de borde empleadas

Condición de borde	Fluidodinámica	Térmica
Entrada	Presiòn uniforme. $P_e = 0$	Temperatura uniforme, $T=T_e$.
Salida	Flujo totalmente desarrollado. Velocidad tangencial nula $u-(u\cdot n)=0$	Derivada normal nula. $\nabla_n T=0$
Simetría	Simetría	Derivada normal nula $\nabla_n T=0$
Pared de tubo	No deslizamiento $u=0$	Temperatura uniforme, $T=T_w$
Superficie de aleta	No deslizamiento $u=0$	Continuidad flujo de calor normal sólido-fluido $k_S \nabla_n T_S = k_F \nabla_n T_F$

Para corroborar la convergencia de malla se realizaron simulaciones con refinamiento para una selección de casos y se comprobó que los valores de transferencia de calor no presentaban variaciones mayores al 2% al aumentar el número de elementos.

Las simulaciones fueron realizadas para distintos arreglos geométricos, variando el número de Reynolds (Re_{Dh}) en cada una de ellas, definido a partir de la velocidad de entrada (u_e) y el diámetro hidráulico (D_h) calculado como el cociente entre el volumen del dominio fluido y la superficie de la aleta y el tubo para la celda unitaria.

$$Re_{Dh} = \frac{u_e \, D_h}{\nu} \qquad D_h = \frac{4V}{A}$$

A los fines de la simulación se ha establecido como fluido que circula por el exterior de los tubos aire, mientras que para el material de las aletas se considera aluminio; las propiedades termofísicas tanto del sólido como del fluido se asumen constantes en ambos dominios y sus valores se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades termofísicas del sólido y del fluido

Propiedad termofísica	Sólido (S)	Fluido (F)	Unidades
Conductividad térmica (k)	237	0.02624	W/(m·K)
Capacidad calorífica (Cp)	897	1005	J/(kg·K)
Densidad (ρ)	2700	1.17	kg/m3
Viscosidad (μ)	-	1.846 e-5	Pa·s

Con los resultados de las simulaciones se calculó el flujo de calor promedio, las temperaturas medias del fluido a la entrada y la salida, $\overline{T}(x_e)$ y $\overline{T}(x_s)$, y la diferencia de temperatura media logarítmica entre el fluido y la temperatura de pared del tubo (T_w). Además se determinó la eficiencia conjunta de tubo y aletas (η_0) a partir de las expresiones de Schmidt [5]. A partir de estos valores se obtuvo el coeficiente pelicular promedio $\overline{h}$.

$$\overline{h} = \frac{\overline{q}}{\sigma \Delta T_{ml}} \quad \text{donde} \quad \Delta T_{ml} = \frac{\overline{T}(x_s) - \overline{T}(x_e)}{ln\left(\frac{T_w - \overline{T}(x_e)}{T_w - \overline{T}(x_s)}\right)} \qquad \overline{T}(x_i) = \frac{\iint_{x_i} T\, u_x dA}{\iint_{x_i} u_x dA}$$

3. Valores experimentales

Se analizaron varios trabajos que reportan valores experimentales de coeficientes de transferencia de calor en intercambiadores de tubos con aletas continuas con arreglo escalonado de cuatro (nc=4) columnas de tubos. Kayansayan [1] informa coeficientes de intercambio de calor de cinco intercambiadores diferentes ensayados en un túnel de viento de sección cuadrada de 500 mm de lado. El aire es aspirado a velocidades de entre 0.5 y 7.6 [m/s] por un soplador que se encuentra aguas abajo del intercambiador. Al entrar al túnel, el aire pasa por un enderezador de flujo y luego recorre 5 m dentro el túnel hasta llegar al intercambiador ensayado. 1 m antes y 1 m después del intercambiador se mide velocidad y temperatura en múltiples puntos de la sección transversal del túnel.

Wang and Chi y Wang et al. [2, 3] utilizaron un dispositivo similar al de Kayansayan [1] pero basado en el estándar de ASHRAE 41.2, con velocidades de 0.55 m/s a 6.25 m/s. De estos trabajos [2, 3] se extractaron valores de once intercambiadores distintos.

Finalmente, del estudio de Abu Madi et al. [4] se relevaron cinco configuraciones geométricas diferentes con velocidades de entre 1.1 a 5.9 [m/s]. Los ensayos fueron realizados en un túnel de viento con características similares al de Wang and Chi [2] y Wang et al. [3], pero con diferencias que permiten lograr un perfil de velocidad uniforme sobre la sección de entrada del intercambiador.

4. Resultados

En total se realizaron simulaciones replicando 21 (veintiún) configuraciones geométricas diferentes modificando el número de Reynolds en un extenso rango. En la Figura 3 se muestra la comparación de los valores de $\overline{h}$ obtenidos numéricamente (*i.e.*, en las simulaciones) con los valores experimentales de cada autor junto el error relativo (ε) para un amplio rango de Re_{Dh}. Se seleccionó una geometría de cada autor para ilustrar la similitud del comportamiento de los resultados de las simulaciones al comprarlo con diferentes dispositivos experimentales. El resto de las simulaciones realizadas mostraron un comportamiento similar al presentado.

Los parámetros geométricos de las configuraciones mostradas en la Figura 3 se presentan en la Tabla 3.
Al comparar los resultados numéricos con los valores experimentales de [1] y [2] se observa que las simulaciones sobreestiman el valor del coeficiente convectivo para bajas velocidades (Re_{Dh}<200) con valores de error relativo (|ε|>40%) que disminuye para Re_{Dh} mayores.

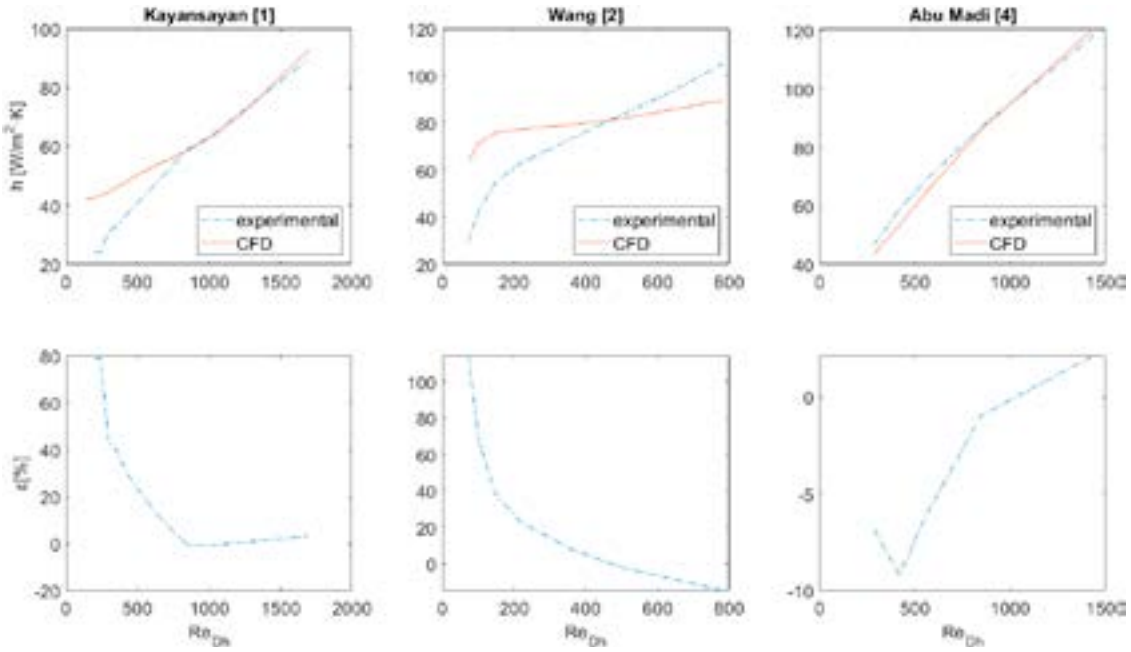


Figura 3. Coeficiente $\bar{h}$ y ε (error relativo).

Para los casos de Kayansayan [1] se alcanza una muy buena aproximación a partir de Re_{Dh}>700 (|ε|<10%), logrando replicar el comportamiento global del coeficiente. En la comparación con los resultados de Wang and Chi [2], si bien ambas curvas tienen una diferencia en la tasa de crecimiento, que hace que se pase de sobrestimar el coeficiente convectivo a subestimarlo a Re_{Dh} >700, esto se produce con un error relativo inferior a 20% a partir de Re_{Dh} >200.
Finalmente, la comparación con los datos experimentales de Abu Madi et al. [4] resulta en una muy buena estimación del coeficiente, con un error relativo menor al 10% que disminuye al aumentar *Re*.

Tabla 3. Configuraciones geométricas comparadas

Autor	*D* [mm]	*Px*	*Py*	*Pz*	*hf*	*nc*
Kayansayan [1]	9.92	2.218	2.551	0.222	0.0202	4
Wang and Chi [2]	8.51	2.239	2.985	0.242	0.0135	4
Abu Madi et al. [4]	9.96	1.657	1.908	0.266	0.0121	4

A partir de las comparaciones realizadas se observa que la capacidad de predicción de las simulaciones puede ser muy diferente al compararlas con resultados obtenidos de distintos dispositivos experimentales. En general, se observa que a bajos Re el error relativo es mayor y a medida que aumenta la velocidad mejora la estimación de los coeficientes, aunque no siempre de manera satisfactoria. A partir del análisis de los dispositivos experimentales utilizados por cada autor se pueden señalar posibles explicaciones a estas diferencias.
Todos los dispositivos cuentan con un orientador de flujo que alinea el flujo en la dirección axial del canal y proporciona un perfil de velocidades uniforme en la sección

transversal de túnel, sin embargo los orientadores se encuentran a una distancia considerable de la unidad estudiada, haciendo posible que se desarrolle un perfil no uniforme de la velocidad axial a la entrada del intercambiador de calor. Como consecuencia este perfil no uniforme no todos los canales del intercambiador trabajaran con la misma velocidad de aire. Tanto Kayansayan [1] como Wang and Chi (2000) y Wang et al. (1996) miden la velocidad en múltiples puntos de la sección transversal para poder obtener un valor promedio de velocidad axial y la temperatura, pero ninguno de ellos informa la variación ni la forma del perfil de velocidad axial a la entrada del intercambiador.
Abu Madi et al. (1998) utilizan un túnel de viento con características similares, pero con una reducción en la sección transversal de túnel luego del orientador del flujo y antes de llegar al intercambiador para lograr un perfil de velocidad uniforme sobre la sección de entrada del intercambiador. En este sentido los autores informan que la variación de la velocidad axial a la entrada al intercambiador es inferior al 2.5%, lo que asegura una distribución prácticamente uniforme de flujo y un comportamiento térmico e hidráulico similar en todos los canales.

5. Conclusión

Puede afirmarse que, en general, se alcanzaron resultados satisfactorios para la comparación entre los valores obtenidos de la simulación y los recabados de estudios experimentales. Simultáneamente, surge que la capacidad de predicción de simulaciones realizadas resulta, en cierta medida, limitada al no incluir al intercambiador completo. El hecho de que se realicen las simulaciones en una geometría reducida presupone que la velocidad promedio del fluido es la misma en todos los canales y, dado que el coeficiente de transferencia convectivo no crece linealmente con la velocidad del fluido, no se puede esperar que el coeficiente $\overline{h}$ obtenido experimentalmente a partir de una distribución no uniforme coincida en forma precisa con el obtenido numéricamente, a partir de un valor de velocidad promedio uniforme. Esto último dificulta la comparación con los valores experimentales que no aseguran esta condición.
Finalmente, el efecto del perfil de velocidades axiales no uniforme a la entrada sobre los valores del coeficiente resulta morigerado para Re_{Dh} crecientes.

Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 2005) y UNLP (PID I270). NJM es investigador del CONICET.

Referencias

[1] Kayansayan, N. (1993). Heat transfer characterization of flat plain fins and round tube heat exchangers. Experimental Thermal and Fluid Science, 6(3), 263–272. https://doi.org/10.1016/0894-1777(93)90067-S.

[2] Wang, C. C., Chi, K. Y. (2000). Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part I: new experimental data. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(15) 2681–2691. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00332-4.

[3] Wang, C.C., Chang Y-J., Hsieh Y-C., Lin Y-T. L. (1996). Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins. International Journal of Refrigeration 19(4), 223–230. https://doi.org/10.1016/0140-7007(96)00021-7

[4] Abu Madi, M., Johns, R. A., Heikal, M. R. (1998). Performance characteristics correlation for round tube and plate finned heat exchangers. International Journal of Refrigeration 21(7) 507–517. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00031-0.

[5] Schmidt T. E. (1949). Heat transfer calculations for extended surfaces. Refrigerating Engineering 351-357.

Diseño de celdas para la cocción óhmica de masas batidas libres de gluten: experimentación, modelado y simulación

Mattioli, Nicolás[1,2] Olivera, Daniela[1,3], Goñi, Sandro[1,2]

[1]Fac. de Ingeniería, UNLP (Av. 1 750, B1900TAG, La Plata). [2]CIDCA, CCT-CONICET La Plata (47 y 116, B1900AFZ La Plata). [3]Fac. de Ciencias Veterinarias, UNLP (Av. 60 y 118, B1900, La Plata). sandro.goni@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El calentamiento óhmico, también llamado calentamiento Joule, es un procesamiento térmico alternativo mediante el cual la resistencia eléctrica del propio alimento genera calor a medida que una corriente eléctrica pasa a través de él. El calor se distribuye de manera muy rápida y uniforme, ya que el calentamiento se produce de forma volumétrica y no depende de la transferencia de calor convencional basada en conducción, convección o radiación (Jaeger y col., 2016). La cantidad de calor generado en el interior del producto está directamente relacionada con el gradiente de voltaje aplicado, con el campo eléctrico y con la conductividad eléctrica del alimento tratado, con lo cual es fundamental que este posea la suficiente cantidad de agua y electrolitos para asegurar el pasaje de la corriente eléctrica. Por lo tanto, esta tecnología se presenta como una interesante alternativa para reemplazar o combinar con el horneado tradicional de panificados y masas batidas (Bender y col., 2019, Khodeir y col., 2021; Panirani y col., 2023). No obstante, su aplicación requiere no solo de una comprensión profunda de los principios físicos implicados, sino de un meticuloso diseño del equipamiento necesario.

En el diseño de un sistema de calentamiento óhmico es fundamental el estudio de diversos factores, entre ellos: el material de los electrodos, que debe ser resistente a la corrosión por alimentos y productos de reacción; la geometría de los mismos y su separación, que influye en la distribución e intensidad del campo eléctrico y, por tanto, en la generación de calor; el aislamiento del sistema, ya que reduce las pérdidas de calor, mejora la eficiencia energética y mantiene la uniformidad de la temperatura; y el empleo de un sistema de control eficiente para regular la potencia aplicada y evitar el sobrecalentamiento del producto (Javed y col., 2024). Por otro lado, en los últimos años se han dedicado esfuerzos al desarrollo de modelos que permitan el diseño y optimización de procesos de calentamiento óhmico, para posibilitar el aprovechamiento de las ventajas de la tecnología óhmica en la industria alimentaria. En este sentido, la modelización matemática es una poderosa herramienta que ayuda a comprender un proceso (Marra y col., 2009). Adicionalmente, un modelo permite diseñar o mejorar el proceso probando modificaciones en las condiciones de operación, el equipo o el alimento, manipulando el modelo antes de probar dicha variación en un proceso real. Javed y col. (2024) revisaron diversas aplicaciones industriales del calentamiento óhmico y los efectos de las condiciones del proceso sobre las cualidades nutricionales y organolépticas, el rendimiento del producto y la eficiencia energética, incluyendo en el estudio, la modelización matemática del proceso. En este sentido, Erdogdu (2023) revisó los retos actuales y futuros del procesado térmico de alimentos, donde la modelización matemática tradicional y emergente jugará un papel significativo para un desarrollo eficiente y sostenible.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue diseñar sistemas de calentamiento óhmico (celdas óhmicas) para la cocción de masas batidas sin gluten, basado en modelado y simulación matemática del proceso, construir dichas celdas óhmicas, y verificar de forma experimental su funcionamiento.

Materiales y métodos

Modelo macroscópico simple para la predicción de tiempos de horneado

Para un sistema ideal donde no se producen pérdidas de calor hacia el ambiente ni evaporación de agua, el balance de energía macroscópico en el sistema se expresa con la Ec. (1) (Içier, 2016). Si se asume que se mantienen constantes diferentes propiedades del material (conductividad eléctrica σ (S/m), densidad ρ (kg/m^3) y capacidad calorífica C_P (J/kg

°C)), y la intensidad de campo eléctrico *E* (V/m) es constante, la Ec. (1) puede resolverse analíticamente (Ec. (2)). Dada la temperatura inicial T_{Ini} y final T_{Fin}, la Ec. (2) se puede manipular para obtener el tiempo de calentamiento requerido (Ec. (3). De esta manera, el tiempo de cocción es inversamente proporcional al cuadrado del campo eléctrico.

$$\rho C_P \frac{dT}{dt} = \sigma |E|^2 \quad (1)$$

$$T(t) = T_{Ini} + \frac{\sigma |E|^2}{\rho C_P} t \quad (2)$$

$$t = \frac{\rho C_P}{\sigma |E|^2} (T_{Fin} - T_{Ini}) \quad (3)$$

Este modelo simple proporciona una primera aproximación para el diseño de una celda óhmica. Debido a que la diferencia de potencial máxima es fija (la red domiciliaria, considerando el diseño de un posible *electrodoméstico*), las celdas deben construirse con una separación de electrodos necesaria para cumplir con las especificaciones deseadas (el campo eléctrico deseado). Como medida de seguridad, también se tuvo en cuenta la corriente que puede circular por el sistema. Para esto, se considera la ecuación de un capacitor (Gally y col., 2016; Zhu y col., 2010):

$$\sigma = \frac{I * L}{\Delta U * A} \quad (4)$$

donde *I* es la corriente que circula por la celda (*A*), *L* es la distancia entre electrodos (*m*), ΔU es la diferencia de potencial (V) entre electrodos, *A* es el área del electrodo (m^2) (Fig. 1). La corriente puede determinarse de la Ec. (4) como:

$$I = \frac{\sigma * \Delta U * A}{L} \quad (5)$$

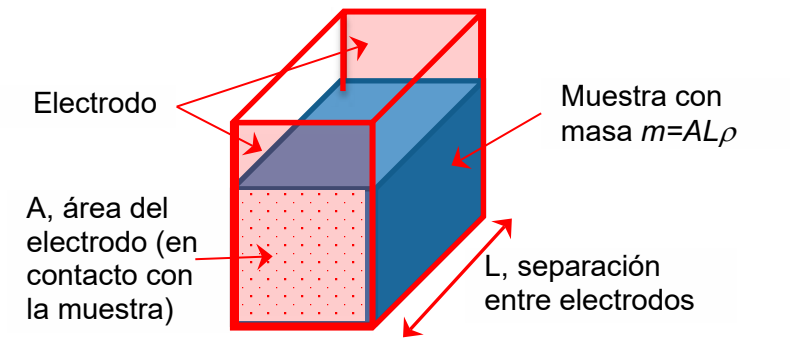


Figura 1. Esquema representativo de una celda óhmica para la cocción de masas batidas.

La masa de muestra *m* (kg) colocada en la celda, puede calcularse con la Ec. (6). Despejando el área de electrodo *A* y reemplazándolo en la Ec. (5), se puede obtener una relación entre la corriente, la masa, el voltaje y la separación de electrodos (Ec. (7)).

$$m = A * L * \rho \quad (6)$$

$$I = \frac{\sigma * \Delta U * m}{L^2 \rho} \quad (7)$$

Para evaluar las ecuaciones (3) y (7) se utilizó 15°C y 95°C de temperatura inicial y final, respectivamente, densidad de 700 kg/m^3, capacidad calorífica de 2900 J/(kg °C), y una conductividad eléctrica σ de 0.15 S/m. Este valor de σ se tomó de Khodeir y col. (2021), quienes reportaron valores entre 0.05 y 0.2 S/m para masas batidas, entre 20 y 100°C. Se usó ΔU = 220 V, un ancho de electrodo de 0.1 m, y los valores de *L* y *m* se seleccionaron de manera tal de tener tiempos de horneado bajos (menores a los del horneado tradicional, considerado de 20 minutos), y corrientes bajas. El reóstato usado en los experimentos

(secciones siguientes) permite usar hasta 10 Amperes, por lo cual se eligieron valores de *L* y *m* que limiten I a no más de 1.5-2 Amperes. Dado que las propiedades pueden cambiar sustancialmente con la temperatura y el contenido de agua, y que las muestras pueden expandirse durante la cocción, las ecuaciones anteriores son solo una estimación aproximada, lo cual refuerza la elección de valores muy conservadores de *m* y *L*. La Fig. 2 muestra un ejemplo de cálculos preliminares, donde se usa masa fija y se cambia *L*. Para *L* bajos la corriente es más alta que la deseada, y para *L* mayores los tiempos son muy largos.

			ΔU (V)	L (m)	E (V/m)	t (min)	I (A)	Altura masa (m)
T ini	15	°C	220	0.025	8800.0	0.23	7.54	0.057
T fin	95	°C	220	0.05	4400.0	0.93	1.89	0.029
Densidad	700	kg/m³	220	0.075	2933.3	2.10	0.84	0.019
Cp	2900	J/(kg °C)	220	0.1	2200.0	3.73	0.47	0.014
Sigma	0.15	S/m	220	0.125	1760.0	5.83	0.30	0.011
Ancho electrodo	0.1	m	220	0.15	1466.7	8.39	0.21	0.010
Masa cruda	0.1	kg						

Figura 2. Ejemplo de una planilla de cálculo usada para la estimación de tiempos de cocción y corriente necesaria, para una masa inicial de muestra de 0.1 kg.

Construcción de las celdas

Una vez realizada una primera estimación de los tiempos de cocción y la corriente necesaria, se construyeron *ad-hoc* dos celdas. A partir de los cálculos iniciales, se consideró mantener una base cercana a los 10 cm de ancho, y con no más de 10 cm de separación entre electrodos. La cantidad de masa a usar debe mantenerse cercana a 0.1 kg para mantener la corriente en los valores deseados.

La primera celda se pensó para usar solo calentamiento óhmico, por lo cual se usó acrílico. La celda está formada por una base de 9 cm de separación entre electrodos, 9.5 cm de lado y 10 cm de altura, con electrodos de acero inoxidable (Fig. 3a). La misma puede desmontarse para remover fácilmente la muestra horneada.

Para la segunda celda, se eligieron materiales que permitan además su uso dentro de hornos tradicionales; con este propósito su uso un molde de silicona, dentro del cual se colocan los electrodos paralelos de acero inoxidable (Fig. 3b). Los mismos fueron maquinados para que tengan la misma curvatura que el molde. En el molde se colocaron dos soportes para mantener los electrodos, y al mismo tiempo que permitan desmontar la celda fácilmente.

Experimentos de cocción

Para las pruebas experimentales se usó una premezcla comercial libre de gluten (Molinos Río de la Plata, Argentina), agregándole leche y huevo. En la 1° celda la masa batida se llenó hasta alcanzar una altura inicial de aprox. 1.5 cm o 124 g de mezcla aprox., mientras que para la misma altura en la 2° celda se usaron 111 g aprox.

Los experimentos con la 1° celda se realizaron aumentando la diferencia de potencial de 0 al voltaje final (135, 180, 225 V, elegidos para obtener campos eléctricos de 15, 20 y 25 V/cm) a razón de 3.6 V/s. Durante los experimentos, se registraron datos de intensidad de corriente (A) y voltaje (V). Para la celda de acrílico se midió además la temperatura de la muestra mediante termocupla y la altura durante el horneado.

Para la 2° celda de silicona, la cual se usa dentro de hornos con aire caliente, se usó únicamente 25 V/cm por cortos periodos de tiempo al inicio del horneado, y no se registraron datos de temperatura o altura, dada la dificultad para colocar instrumentos dentro de un ambiente a elevada temperatura.

Balance macroscópico de materia y energía del sistema de calentamiento óhmico

Dado que durante el calentamiento hay pérdida de energía hacia el ambiente, hay pérdidas de agua por evaporación, y cambian todas las propiedades del material, el modelo 1 no puede usarse de forma apropiada con fines predictivos con alta precisión. Por lo tanto, se desarrolló un segundo modelo macroscópico considerando estos efectos, el cual puede predecir tanto los tiempos de cocción como los perfiles de temperatura de miga.

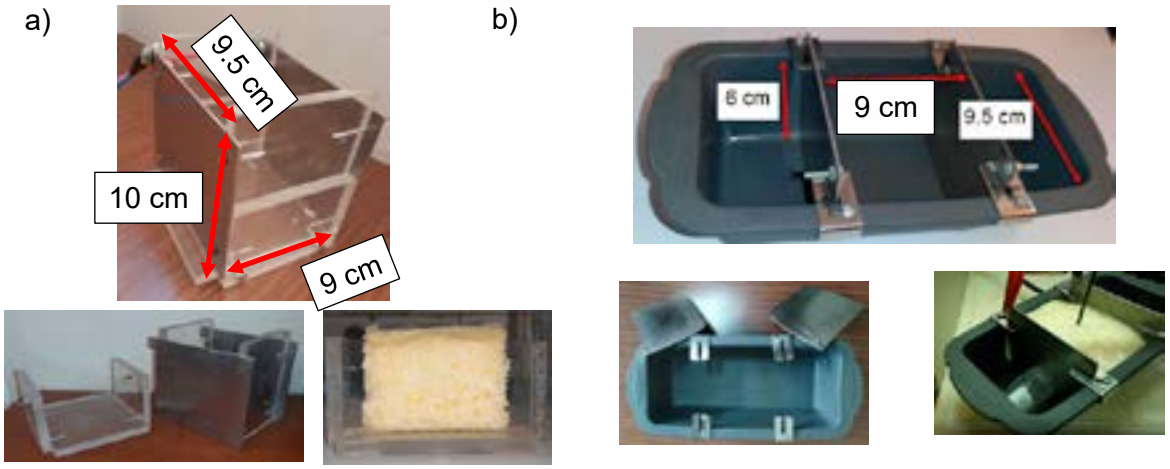


Figura 3. Celdas óhmicas construidas. a) Celda de acrílico de 1 cm de espesor; b) celda de silicona.

El modelo se describe por dos ecuaciones diferenciales ordinarias, formadas por un balance de energía y un balance de materia. En el balance de energía (Ec. (8)) se considera el calentamiento Joule, campo eléctrico variable, energía asociada a la evaporación de agua y pérdida de calor hacia el ambiente. En el modelo del balance de energía, mientras *T* es menor a T_E, el calor aportado al sistema se utiliza para calentar la muestra. Cuando dicho umbral de temperatura es alcanzado, el calor aportado es utilizado para la evaporación de agua. En el balance de materia (Ec. (9)) se asume que mientras *T* es menor a T_E no hay evaporación de agua. El valor de T_E (ºC), es un parámetro de ajuste del modelo.

$$mC_P \frac{dT}{dt} = VOL * \sigma(T) * (E)^2 + \lambda \frac{dm}{dt} + UA(T - T_{Amb}) \quad (8)$$

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} 0, & si\ T \leq T_E°C \\ -\frac{VOL*\sigma*(E)^2}{\lambda}, & si\ T > T_E°C \end{cases} \quad (9)$$

VOL (m^3) es el volumen de la muestra, λ es la entalpía de vaporización (J/kg), *UA* (W/°C) es el producto entre un coeficiente efectivo de transferencia de energía y al área de transferencia. Para tener una transición suave entre no evaporación y evaporación, se usó una función Heaviside de ancho ΔT. La conductividad eléctrica se expresó como una función exponencial-cuadrática dependiente de T:

$$\sigma_{pred} = \exp(a + bT + cT^2) \quad (10)$$

El ajuste de *a*, *b*, *c*, ΔT, T_E y *UA*, se realizó por medio de la resolución de un problema inverso, minimizando el error relativo para los perfiles de *T* y la masa final, para las tres condiciones de campo eléctrico (*CE*) simultáneamente:

$$Objetivo = 100 \sum_{CE=15,20,25\ V/cm} \left\{ \left| \frac{m_{Sim,CE} - m_{Exp,CE}}{m_{Exp,CE}} \right| + \sum_{i=1}^{n_{CE}} \left| \frac{T_{S,CE,i} - T_{E,CE,i}}{T_{E,CE,,i}} \right| \right\} \quad (11)$$

De esta manera, el único punto disponible para la masa (la masa final) a cada *CE*, tiene el mismo peso que todos los puntos de temperatura disponibles para cada *CE*. Al usar todas las condiciones simultáneamente, se obtiene una única solución.
El sistema de ecuaciones diferenciales que describe el sistema se resolvió por el método de Runge-Kutta de 4º orden, y se usó un método de optimización por gradiente de la función objetivo (función *fmincon* de MATLAB). Estas determinaciones se realizaron con datos de la 1° celda únicamente, para las cuales se dispone de perfiles de temperatura.

Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra los valores predichos con el 1° modelo teórico, para los campos eléctricos de 15, 20 y 25 V/cm. Se usaron 15°C y 95°C de temperatura inicial y final, respectivamente, densidad de 700 kg/m^3, capacidad calorífica de 2900 J/(kg °C), y conductividad eléctrica de 0.15 S/m. La variación de la temperatura vs. tiempo no se muestra, pero se ve de la Ec. (2) que es una recta. En un proceso real, la conductividad eléctrica aumenta con la temperatura, por lo cual las curvas de temperatura tienen una forma más parabólica (Khodeir y col., 2021). Con la 1º celda, se realizaron experimentos a los tres campos eléctricos. Los tiempos experimentales (para alcanzar 95°C) se muestran en la Tabla 1, para un conjunto de experimentos en particular. En general son mayores que los tiempos teóricos, dado que en los experimentos se partió de voltaje 0, y se incrementó al voltaje final a diferentes tiempos (38, 50 y 63 segundos para llegar a 135, 108 y 225 V, respectivamente).

La Tabla 1 muestra también los tiempos de cocción predichos con el 2° modelo; dado que el mismo se ajustó a los datos experimentales, la predicción es mucho más cercana. La Tabla 1 muestra también el rango de corriente máxima obtenida en diferentes experimentos, las cuales se mantuvieron por debajo del límite de diseño calculado en la fase inicial.

Tabla 1. Valores de tiempo de horneado experimental y calculados con los diferentes modelos.

Campo eléctrico (V/m)	Tiempo de horneado (min)			Corriente máxima (A), diferentes ensayos
	Modelo 1	Experimental	Modelo 2	
1500	7.76	8.70	8.42	0.59-0.63
2000	4.44	5.10	4.98	0.83-0.91
2500	2.89	3.41	3.46	1.11-1.15

En los experimentos, cuando la miga alcanzó 95°C, la temperatura superficial fue menor (resultados no mostrados), dado que se mantiene en contacto con aire más frío. Esta menor temperatura retrasa la gelatinización del almidón, y la superficie mantiene un aspecto líquido. Para solucionar esto, la cocción se continuó el doble de tiempo. Debido a este aumento del tiempo de procesamiento, y que la muestra ya está caliente, aparecen pérdidas de agua por evaporación (la mayor parte de la energía suministrada se usa para evaporar agua). El diseño de la 2° celda puede solucionar estas deficiencias: el aire caliente del ambiente del horno puede cocinar la superficie mientras las regiones interiores se calientan de forma óhmica. La Fig. 4 muestra el Modelo 2 (Ec. (8-9)) ajustado, para los tres gradientes de voltaje, donde puede verse que se continuó el experimento y el ajuste del modelo más allá de llegar a los 95°C.

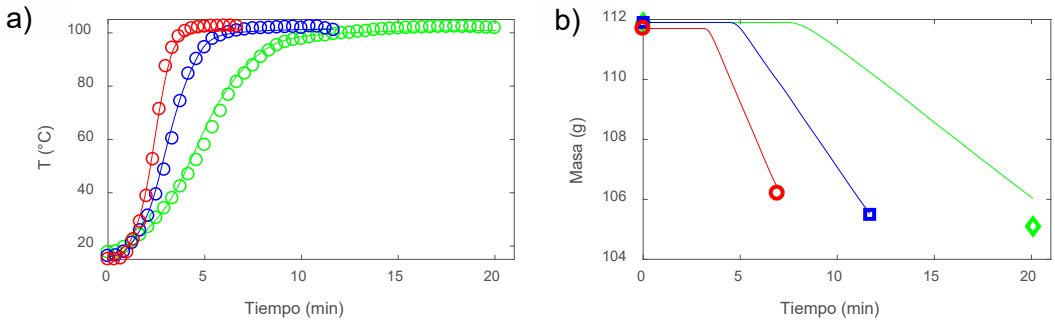


Figura 4. Valores experimentales (símbolo) y simulados (líneas). a): perfiles de temperatura; b): masa. Rojo: 2500 V/m. Azul: 2000 V/m. Verde: 1500 V/m.

La Tabla 2 muestra los errores relativos obtenidos para el ajuste del Modelo 2, tanto para los perfiles de temperatura, como para la masa final. Es importante mencionar que el modelo 2

se podría usar solo hasta 95°C, en cuyo caso el balance de materia no es necesario, dado que las pérdidas de agua por evaporación hasta ese punto son mínimas.

Tabla 2. Errores relativos del ajuste del modelo 2.

Campo eléctrico (V/m)	Error % para las curvas de temperatura (muchos puntos)	Error % para el peso final (1 punto)
1500	1.97	0.89
2000	1.78	0.03
2500	3.73	0.18

Los valores de los parámetros ajustados fueron *a*: -4.368, *b:* 0.108*, c*: -0.001 (para la conductividad eléctrica); ΔT: 8.96°C, T_E: 95.1°C (para la transición a evaporación), y *UA*: 0.0149 W/°C. La función ajustada de σ varía entre 0.05 y 0.22 S/m, incluyendo el valor de 0.15 S/m supuesto para evaluar el modelo teórico 1.

Conclusiones

En este trabajo se usó el balance de energía para una celda óhmica, suponiendo propiedades constantes, y la ecuación de un capacitor, para diseñar celdas óhmicas para el horneado de masa batidas. Los objetivos fueron obtener un tiempo de cocción breve (menor al horneado tradicional), con valores bajos de intensidad de corriente. A partir de los cálculos realizados, se construyeron dos celdas óhmicas usando electrodos de acero inoxidable, con separación de electrodos no mayor a 10 cm, y los experimentos iniciales se realizaron con masas cercanas a 0.1 kg. Las celdas construidas demuestran el potencial de la tecnología óhmica y su posible uso para el desarrollo de electrodomésticos. Para avanzar en este sentido se necesita un abordaje multidisciplinario, involucrando electrónica, materiales, sistemas y estudios de mercado con potenciales usuarios, entre otros.

Bibliografía

Bender, D., Gratz, M., Vogt, S., Fauster, T., Wicki, B., Pichler, S., y col (2019). Ohmic Heating-A Novel Approach for Gluten-Free Bread Baking. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1603–1613.

Erdogdu, F. (2023). Mathematical modelling of food thermal processing: Current and future chal-lenges. *Current Opinion in Food Science*, 101042.

Gally, T., Rouaud, O., Jury, V., Le-Bail, A. (2016). Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling. *Journal of Food Engineering*, 190, 176-184.

Içier, F. (2016). Chapter 16, Modeling static vs. continuous system. In: Ramaswamy, H., Marcotte, M., Sastry, S., & Abderlrahin, K. Ohmic Heating in Food Processing. CRC Press, Taylor and Francis, USA.

Jaeger, H., Roth, A., Toepfl, S., Holzhauser, T., Engel, K.H., Knorr, D., y col. (2016). Steinberg Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 84-97.

Javed, T., Oluwole-Ojo, O., Zhang, H., Akmal, M., Breikin, T., O'Brien, A. (2024). System Design, Modelling, Energy Analysis, and Industrial Applications of Ohmic Heating Technology. *Food Bioprocess Technology*, 18, 2195-2217.

Khodeir, M., Rouaud, O., Ogé, A., Jury, V., Le-Bail, P., Le-Bail, A. (2021). Study of continuous cake pre-baking in a rectangular channel using ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, 102580.

Marra, F., Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A. (2009). Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 56–63.

Zhu, S.M., Zareifard, M.R., Chen, C.R., Marcote, M., Grabowski, S. (2010). Electrical conductivity of particle–fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation. *Food Research International*, 43, 1666-1672.

ALTERNATIVAS A GRASAS SATURADAS: CARACTERIZACIÓN DE OLEOGELES Y EMULSIONES W/O A PARTIR DE CERAS NATURALES PARA APLICACIONES ALIMENTARIAS

Pino, Neuvis Alejandro [(1)], Marchetti, Lucas [(1)], Lorenzo, Gabriel [(1,2)]

[1] Laboratorio de Investigación en Hidrocoloides y Matrices Alimentarias Saludables (LIHMAS), Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos (CIDCA), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
[2] Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina.
E-mail: gabriel.lorenzo@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

La creciente demanda de alimentos más saludables ha aumentado la conciencia sobre los riesgos de ciertos ingredientes, especialmente las grasas trans (GT) y saturadas (GS), asociadas con enfermedades crónicas como las enfermedades cardiovasculares, la diabetes tipo II y la obesidad. En respuesta a esta problemática, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) lanzó el plan REPLACE, con el objetivo de eliminar las GT industriales de los alimentos y resaltando la importancia de una alimentación saludable reduciendo el consumo de GS (OMS 2020). No obstante, estas grasas desempeñan un papel esencial en la calidad sensorial de los alimentos, influyendo en el sabor y la textura (Chaves y col, 2018). Por ende, el reto actual consiste en controlar su ingesta sin comprometer las propiedades organolépticas de los productos, lo que ha impulsado la búsqueda de métodos para sustituir estos ingredientes sin afectar las expectativas de los consumidores.

Una de las estrategias emergentes consiste en la formación de geles, que permiten transformar aceites vegetales ricos en grasas insaturadas en sistemas semisólidos sin afectar las cualidades sensoriales y funcionales de los alimentos (Patel, 2015). Los geles pueden clasificarse según la polaridad de la fase líquida en hidrogeles, geles emulsionados y oleogeles (Guo y col, 2023). Los oleogeles (OG) son materiales viscoelásticos compuestos por aceite y agentes estructurantes, formando una red tridimensional que proporciona diversas propiedades mecánicas (Blake y col, 2014). En estudios previos (Pino y col, 2024) se pudo caracterizar el efecto del uso de ceras naturales de abeja (B), carnauba (C) y soja (S) como agentes oleogelantes, resaltando un efecto sinérgico entre B y C, mientras que las mezclas binarias que contenían S presentaron un antagonismo que afectó sus propiedades estructurales, por lo que se limitó el avance con este oleogelante.

Por otro lado, la creación de emulsiones agua en aceite (W/O) a partir de OG también propone una solución prometedora para desarrollar productos con menos calorías, combinando gelificación y encapsulación de agua para mantener las características texturales y sensoriales a bajo costo, sin comprometer la calidad (Silva y col, 2021). No obstante, integrar eficazmente las fases acuosa y oleosa enfrenta otros desafíos técnicos, especialmente en términos de estabilidad a largo plazo y resistencia mecánica del gel.

Por ello, el objetivo de este trabajo fue la caracterización del efecto sinérgico previamente observado en OG desarrollados con B y C, así como también estudiar su uso como fase continua en emulsiones W/O para promoverlos como posibles sustitutos de GT y GS.

2. Parte experimental

2.1 Preparación de Oleogeles

Los oleogeles fueron preparados a partir de mezclas binarias de ceras de abeja y cera de carnauba. La Figura 1 muestra las formulaciones que se elaboraron disolviendo las diferentes

mezclas (concentración total de cera: 3, 6 y 9 %) en aceite de girasol comercial a 90 ± 1 °C durante 30 min, empleando un baño termostático (Masson Digital, Vicking S.R.L., Buenos Aires, Argentina) con agitación constante a 120 rpm. Posteriormente, las muestras se obtuvieron mediante cristalización en reposo a temperatura ambiente durante 30 min para ser luego almacenadas a 4 °C durante 24 h.

2.2 Ensayos de caracterización de los OG

Para los OG obtenidos a las 3 concentraciones de trabajo como se indica en la Figura 1 se determinaron las características mecánicas:

2.2.1 Ensayos de punción

Se utilizó un texturómetro CT3 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleboro, MA, USA) con una sonda de 6 mm de diámetro, penetrando 20 mm a una velocidad de 0.50 mm/s, y se obtuvieron la fuerza máxima de perforación (N) y el trabajo de punción (mJ).

2.2.2 Ensayos reológicos

Las mediciones se llevaron a cabo en un reómetro de esfuerzo controlado TA Discovery HR20 (TA Instruments, EE.UU.) utilizando una geometría de platos paralelos de 40 mm. Los barridos de frecuencia se realizaron dentro del rango 0.01 - 100 rad/s, a 25 °C, para evaluar la variación de los módulos elástico (G') y viscoso (G"). Todas las mediciones se realizaron al menos por duplicado.

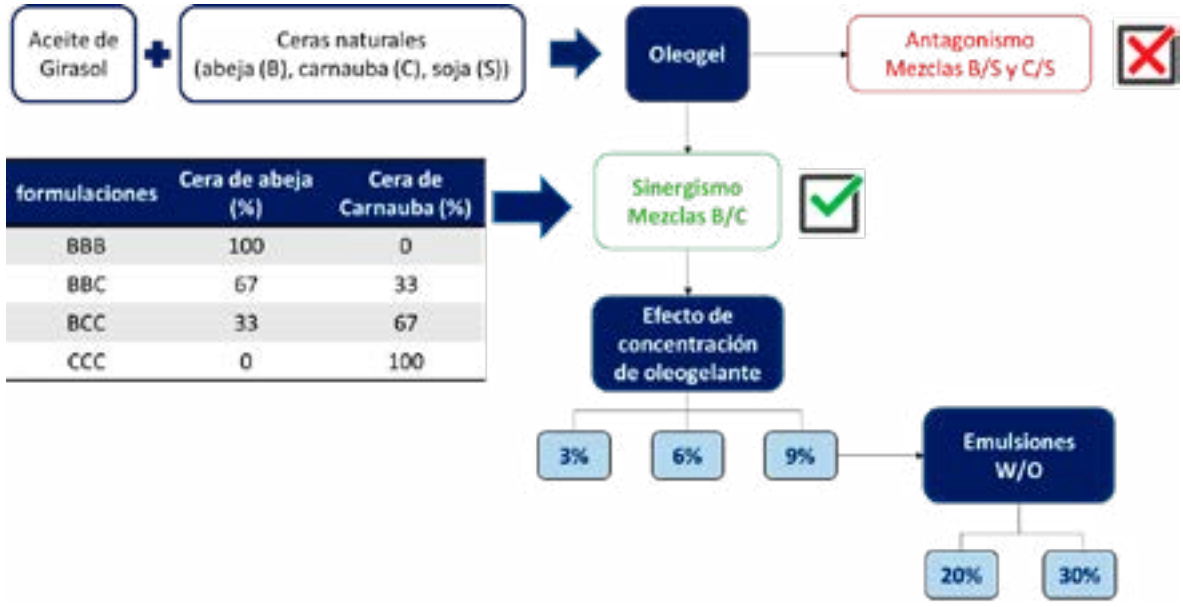


***Figura 1**: Esquema general de preparación y diseño experimental de oleogeles y emulsiones.*

2.2.3 Contenido de grasa sólida

Se determinó el contenido de grasa sólida (SFC) mediante resonancia magnética nuclear de bajo campo (RMN-1H) tanto para el aceite como para los OG mencionados en la Figura 1. Para ello se fundieron las muestras en tubos de RMN de 10 mm de diámetro a una altura de 6 cm. El SFC se midió de acuerdo con el método oficial Cd 16b-93 de la AOCS (AOCS, 2009). Las muestras fueron mantenidas a 100 ºC durante 15 min, 24 h antes del análisis, y luego fueron llevadas a diferentes temperaturas de medición (de -30 a 80 °C) y estabilizadas durante 30 min antes de ser analizadas. Las mediciones se realizaron en un Minispec mq20 de 20 MHz (Bruker, Billerica, MA, EE.UU.), calibrado con estándares Bruker (0.0 %, 31.6 % y 74.3 % de SFC).

2.3 Preparación de emulsiones W/O

Se prepararon emulsiones W/O utilizando los oleogeles elaborados con B y C a 9 % como fase continua, con diferentes niveles de agua (20 % y 30 %) como se indica en la Figura 1. Las emulsiones se obtuvieron calentando a 90 °C el agua y el OG, luego se mezclaron

empleando un agitador Ultraturrax a 12000 rpm durante 2 min y se enfriaron en un baño de agua/hielo para promover la rápida formación del gel.

2.4 Ensayos de caracterización de emulsiones W/O

Sobre las emulsiones obtenidas, se realizaron los siguientes ensayos:

2.4.1 Determinación del color

El color de las emulsiones se determinó utilizando un colorímetro CR-400 (Minolta Co., Wayne, NJ, EE.UU.), basado en el sistema de color CIELAB.

2.4.1 Estabilidad y retención de agua

Se determinó la cantidad efectiva de agua incorporada a la emulsión y las pérdidas de fase dispersa en el tiempo durante un período de 15 días a 20 °C.

2.4.2 Ensayos reológicos

Las emulsiones W/O fueron sometidas a ensayos oscilatorios según lo descripto en 2.2.2

2.4.3 Caracterización microscópica

Se realizaron observaciones microscópicas para estudiar la estructura de los cristales y el tamaño de las gotas en las emulsiones W/O. Se empleó un microscopio óptico (DM 500; Leica Microsystems, Wetzlar, Alemania) con luz polarizada y una cámara integrada. Se escanearon al menos 10 campos independientes, obteniendo micrografías a un aumento de 63×, mediante las cuales se determinó el $D_{4,3}$ como referente del espacio tridimensional que ocupan las gotas formadas durante la emulsificación, siguiendo la metodología descripta por Yan y col (2024).

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto de la concentración de oleogelante

La textura es una de las propiedades clave de los oleogeles y constituye el principal foco de análisis en este estudio. Los resultados de las pruebas de punción, presentados en la Figura 2a, muestran que la fuerza de ruptura aumentó con el incremento en la concentración de ceras Las mezclas B/C en los tres niveles de concentración evaluados presentaron valores significativamente mayores que los OG formados con una sola cera, corroborando los resultados previamente observados (Pino y col, 2024).

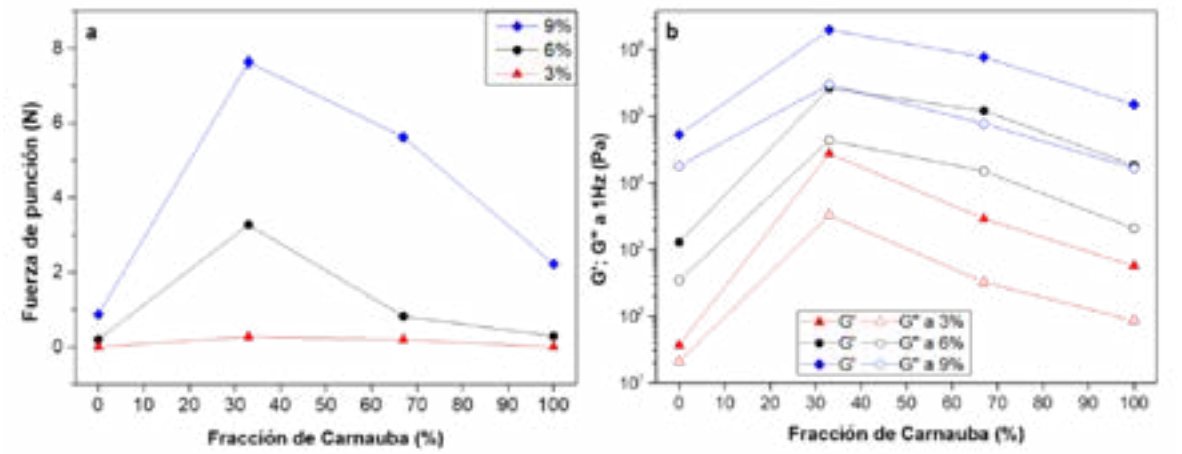


Figura 2: *Propiedades mecánicas de los OG a) Fuerza de punción y b) Módulos elástico y viscoso con distintas concentraciones de oleogelante en función de la proporción de cerca de carnauba.*

Los estudios reológicos indicaron que las muestras presentaban características de sistemas gelificados, con valores del módulo elástico (G') superiores al módulo viscoso (G'') en el rango de frecuencias evaluado. La Figura 2b muestra los valores de ambos módulos (elástico y viscoso) para los OG en sus diferentes concentraciones, obtenidos a una frecuencia de 1Hz. Se observa un incremento en los módulos directamente asociado a los niveles de concentración, así como también se puede identificar el efecto sinérgico en los OG con mezclas binarias. La congruencia entre los resultados de estas dos técnicas, obtenidos tanto

en ensayos con grandes deformaciones (punción) como en pequeñas (dentro del rango viscoelastico lineal), permite asegurar la existencia de un aumento de las características mecánicas de los OG obtenidos a través de mezclas de B y C, y que no es afectado por la concentración.

Aunque los efectos sinérgicos en mezclas binarias de ceras han sido reportados previamente, el fenómeno observado en este estudio fue más pronunciado en las mezclas B/C, lo que supera los efectos documentados en investigaciones previas (Sarwar y col., 2016; Tavernier y col., 2017). Las propiedades mecánicas mejoradas en estas mezclas pueden atribuirse a las diferencias en la composición química y el número total de átomos de carbono en las ceras, lo que afecta directamente sus hábitos cristalinos (Blake y col., 2018; Brykczynski y col., 2022). La combinación de estos hábitos cristalinos puede contribuir a un empaquetamiento más compacto en las mezclas B/C, lo que explicaría las diferencias en las propiedades texturales observadas. Tavernier et al. (2017) sugirieron un mecanismo similar para las mezclas de cera de abeja y cera de salvado de arroz, en el que los cristales de la cera de salvado formaban una estructura central que facilitaba la cristalización de la cera de abeja, creando una red híbrida. La cera de carnauba, por su composición química, podría tener un comportamiento similar en la formación de estructuras de esqueleto en los OG actuales.

Los resultados del contenido de grasa sólida (SFC) se muestran en la Figura 3. Se observó que las muestras presentaron un SFC inferior al 9% a temperatura ambiente (20 ºC) para todos los OG, lo que indica una solubilidad parcial de las ceras en el aceite a esta temperatura.

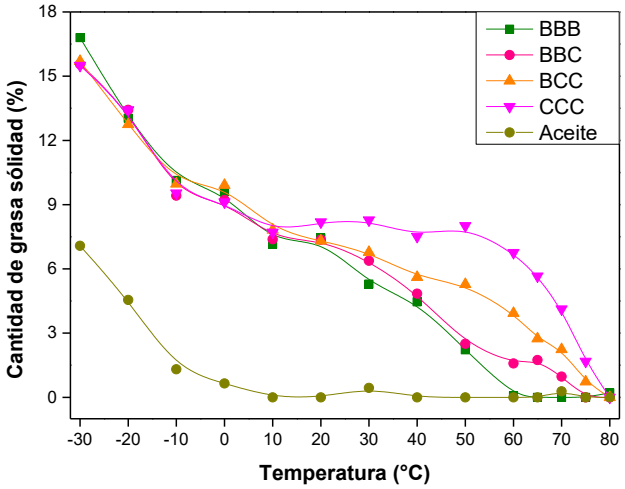


Figura 3: *Contenido de grasa sólida para el aceite y los OG con 9% de oleogelante en función de la temperatura.*

En las muestras CCC, la curva de SFC versus temperatura mostró una región de plateau entre 10°C y 50°C, lo que indica un comportamiento estable en la formación de sólidos. A medida que se aumentó la proporción de B, esta región disminuyó, atribuible a los puntos de fusión de cada una de las ceras puras. Estas características de los OG, permitiría lograr una mejora en las propiedades organolépticas aumentando el contenido de cera de abeja por disminución de la sensación de serosidad durante su ingesta (Dos Santos y col, 2014).

3.2 Emulsiones W/O

La obtención de emulsiones W/O a partir de estos OG puede resultar en una estrategia prometedora para desarrollar productos de menor contenido calórico, combinando oleogelación del aceite (la fase continua) y encapsulación de agua (fase dispersa) para preservar las características texturales y sensoriales a un costo reducido. Las emulsiones resultantes fueron estables, logrando una gelificación eficiente y reteniendo un 99.7% del agua incorporada, independientemente de la concentración de agua o del tipo de OG utilizado. Las

pérdidas de agua fueron inferiores al 1% durante las primeras 48 horas y se mantuvieron estables durante un período de dos semanas (Figura 4a y b).

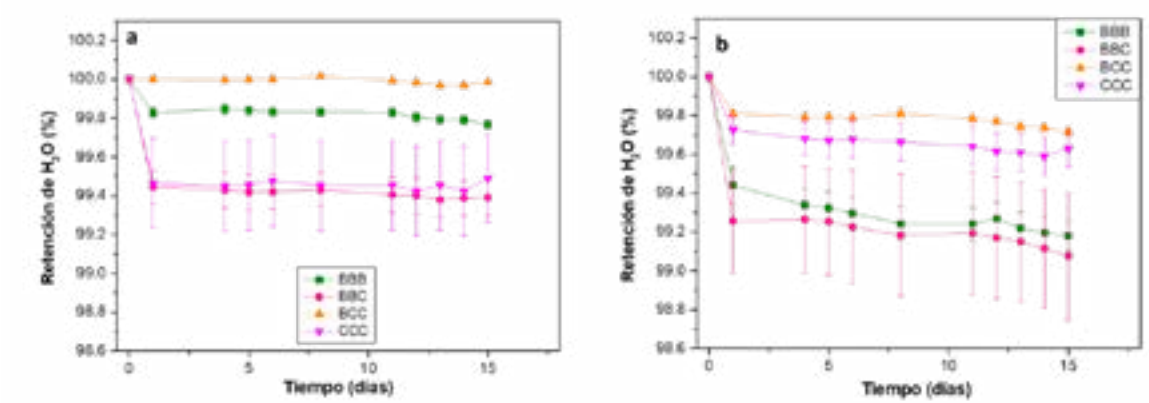


Figura 4: *Retención de agua en función del tiempo de almacenamiento para las emusiones W/O. a) con 20% de fase dispersa y b) con 30% de fase dispersa.*

En términos de color, las emulsiones preparadas sólo con C mostraron los mayores valores de luminosidad (L) y saturación (b*) (89.76 y 22.44, respectivamente). El aumento en la concentración de agua redujo la intensidad de los colores, mientras que se observó un aumento significativo en la luminosidad ($P<0.05$).

A través de la microscopía (Figura 5a), se determinó la distribución del tamaño de las gotas y se calculó el $D_{4,3}$, permitiendo identificar una reducción significativa del tamaño de gota a medida que aumentó la concentración de C en las emulsiones formuladas (1.36 µm a 2.04 µm). Esto podría estar relacionado con las diferencias en los puntos de fusión de las ceras, lo que genera diferentes velocidades de gelificación y estabilización de las emulsiones. Los tamaños de gota aumentaron con la concentración de agua, lo que concuerda con el aumento de luminosidad observado.

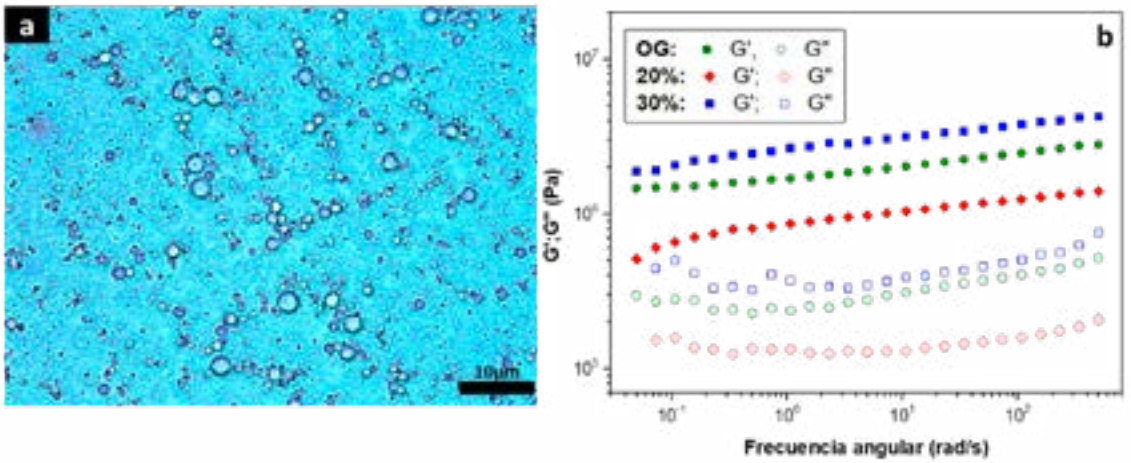


Figura 5: *a) Micrografía de emulsión W/O con 30% de agua y 9% de BBC en el oleogel. b) barrido de frecuencias para OG con 9% de BBC y las correspondientes emulsiones con distintas concentraciones de fase dispersa.*

La Figura 5b muestra los espectros mecánicos de las emulsiones obtenidas con BBC a distintas concentraciones de fase dispersa. Para todos los sistemas se pudo notar un comportamiento similar al observado para esta mezcla de ceras. La inclusión de agua en concentración baja (20%) debilitó la estructura del sistema, observándose una reducción en las propiedades mecánicas respecto al OG. Sin embargo, cuando el contenido de fase dispersa fue más alto (30%), empieza a tener peso el mayor empaquetamiento de la fase dispersa y hace que se vuelvan a recuperar los valores de los módulos G' y G'' alcanzando y

hasta superando las características viscoelásticas de los OG puros. Esto podría estar relacionado con un sistema más compacto, compuesto tanto por gotas de agua como por cristales de cera.

Conclusiones:

Las mezclas de B y C mostraron un notable efecto sinérgico, mejorando significativamente las propiedades mecánicas de los oleogeles en comparación con las ceras individuales y con la potencialidad de reducción de la sensación de serosidad debido a su bajo SFC a temperatura corporal. En particular, los resultados de la combinación BBC permiten pensar en un sustituto satisfactorio para grasas saturadas debido a su combinación de propiedades mecánicas y contenido de sólidos.

El aumento en la concentración total de ceras resultó en un incremento de las características físicas de los OG, indicando una relación directa entre la concentración de oleogelante y las características mecánicas del producto final, ofreciendo oportunidades para ampliar su rango de aplicación.

Finalmente, las emulsiones W/O formuladas a partir de OG mostraron características mecánicas similares a los OG, además de una excelente estabilidad, manteniendo un 99.7% de retención de agua, lo que las hace adecuadas para aplicaciones de baja caloría y encapsulación de agua sin comprometer las propiedades sensoriales.

Estos resultados abren nuevas posibilidades para desarrollar productos con propiedades optimizadas y aplicaciones en diversas áreas, como la cosmética, farmacéutica y alimentaria.

Bibliografía.

Blake, A. I., Co, E. D., & Marangoni, A. G. (2014). Journal of the American Oil Chemists' Society, 91(6), 885-903.

Blake, A. I., Toro-Vazquez, J. F., & Hwang, H. S. (2018). In Edible oleogels (pp. 133-171). AOCS Press.

Brykczynski, H., Wettlaufer, T., & Flöter, E. (2022). Journal of the American Oil Chemists' Society, 99(11), 925-941.

AOCS (2009). 16b-93. Official Methods and Recommended Practices of the AOCS.

Chaves, K. F., Barrera-Arellano, D., & Ribeiro, A. P. B. (2018).Food Research International, 105, 863-872.

Dos Santos, M. T., Gerbaud, V., & Le Roux, G. A. C. (2014). Journal of Food Engineering, 126, 198-205.

Guo, J., Cui, L., & Meng, Z. (2023). Food Hydrocolloids, 137, 108313.

OMS (2018). REPLACE Trans fat-free. Accedido en: https://www.who.int/teams/nutrition-and-food-safety/replace-trans-fat

OMS (2020). Healthy diet. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet

Patel, A. R. (2015). Alternative routes to oil structuring (pp. 15-27). New York, USA: Springer International Publishing.

Pino, N. A., Marchetti, L., & Lorenzo, G. (2024). Journal of the Science of Food and Agriculture, 104(10), 6157-6165.

Sarwar, A., Vunguturi, S., & Ferdose, A. (2016). International Journal of Engineering Technology Science Research, 3(5), 271-273.

Silva, T. J., Barrera-Arellano, D., & Ribeiro, A. P. B. (2021). Journal of Food Science, 86(7), 2785-2801.

Tavernier, I., Doan, C. D., Van de Walle, D., Danthine, S., Rimaux, T., & Dewettinck, K. (2017). RSC advances, 7(20), 12113-12125.

Yan, Y., Chen, S., Deng, L., Duan, Y., Huang, Z., Gong, D., & Zhang, G. (2024). Food Hydrocolloids, 150, 109720.

CIRCULARIDAD PRODUCTIVA EN LA CADENA DE INDUSTRIALIZACIÓN DEL POROTO: ANÁLISIS TECNOFUNCIONAL DE HARINAS *PHASEOLUS VULGARIS* L. Y COPRODUCTOS

Golzi, María Eugenia[1]; Nagai, Nadia Florencia[1]; Marchetti, Lucas[1]; Lorenzo, Gabriel[1,2]; Andrés, Silvina Cecilia[1]

[1]Laboratorio de Investigación en Hidrocoloides y Matrices Alimentarias Saludables (LIHMAS), Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos (CIDCA), La Plata, Buenos Aires, Argentina. [2]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los porotos (*Phaseolus vulgaris* L.), constituyen las legumbres más comúnmente consumidas en el mundo debido a su elevado contenido proteico, compuestos fenólicos y propiedades antioxidantes. Representan además uno de los recursos más sustentables, de baja huella de carbono y de alta disponibilidad alimenticia. Constituyen alimentos básicos cotidianos en dietas basadas en plantas recientemente identificados por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) como promotores de mitigación de cambio climático por reducción del consumo de carne y su concomitante costo de producción (Carbas y col., 2020). Insertados en el norte de Argentina en 1914 y convertidos en la principal actividad de la economía del NOA, son en su mayoría destinados a exportación, siendo sólo el 10 % consumido anualmente en el mercado doméstico (800 g/habitante/año) (MAGyP, 2021). A fin de incrementar su consumo, la industria busca incorporarlos en nuevos alimentos basándose en su funcionalidad y en el efecto positivo para la salud y medioambiente. Sin embargo, debido a su contenido de antinutrientes es importante evaluar tratamientos que los reduzcan o eliminen. El procesamiento además modifica sus propiedades funcionales, que puede ocurrir por i) cambios en la composición nutricional general luego del procesamiento, y/o ii) modificaciones en la estructura y conformación de proteínas y otros componentes presentes (Sharan y col., 2021). Consecuentemente, estos cambios a partir el procesamiento se verán reflejados en sus respectivas harinas.

El remojo de legumbres es necesario para su consumo como tal, pero durante este proceso ocurren pérdidas nutricionales por lixiviación. Este tratamiento implica la hidratación hasta 45-55 % de humedad asegurando la expansión uniforme de las cubiertas de los granos y del cotiledón, así como la hidratación celular que ayuda en la transferencia de calor y subsecuente ablandamiento del grano. La cocción en agua hirviendo o a presión, provocan el ablandamiento del cotiledón, incrementando la palatabilidad y aumentando su digestibilidad. Sin embargo, estos tratamientos producen grandes volúmenes de agua (tanto de remojo como de cocción) que en la actualidad se desechan pero que presentan gran cantidad de macro y micronutrientes que aún pueden ser aprovechados por sus propiedades nutricionales y tecnofuncionales. El agua de cocción de garbanzos (o aquafaba) ha sido estudiada, presentando gran aplicabilidad como espumante, emulsionante o gelificante en distintos productos alimenticios (Stantiall y col., 2018). Sin embargo, aún no se han encontrado trabajos que analicen el aquafaba proveniente de porotos.

El objetivo de este trabajo fue, mediante una estrategia multidisciplinaria, incrementar el consumo de porotos (*Phaseolus vulgaris* L., cv Escarlata) contribuyendo a la circularidad de su cadena productiva, mediante su revalorización como materia prima para la producción de harinas y el aprovechamiento de coproductos para una alimentación saludable y sostenible.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Determinación de los tiempos de remojo y cocción

Estudio de la cinética de hidratación durante el remojo: Se evaluó mediante el aumento de peso de los porotos en el tiempo. Para ello se prepararon recipientes cerrados conteniendo un poroto y agua destilada para evitar una posible influencia de iones en el proceso (relación 1:5 de porotos:agua). Para cada poroto, se registró el peso inicial antes del remojo y, a distintos tiempos durante 24 h, se retiraron las muestras, se registró su peso y se volvieron a sumergir en el recipiente para continuar el proceso. La medida se realizó por quintuplicado.

Estudio del proceso de cocción: Los porotos fueron remojados durante el tiempo óptimo definido en el ensayo anterior. Luego, se descartó el agua de remojo, y los mismos se sometieron a cocción tradicional a presión atmosférica y 100 ºC con agua destilada (relación 1:5 de porotos:agua). A distintos tiempos (10, 20, 30, 40, 50 y 60 min) se retiraron entre 5 y 7 porotos, los cuales se colocaron inmediatamente en agua destilada con hielo durante 10 min para detener la cocción. Cada una de las muestras fue sometida a un ensayo de punción en texturómetro CT3 (Brookfield, EE.UU.), empleando una sonda de 2 mm para registrar la fuerza máxima (dureza) luego de penetrar hasta el 50% de su dimensión. Para cada tiempo de cocción se realizaron 10 medidas.

2. Caracterización nutricional y funcional de harinas

Se obtuvieron tres harinas: harina de porotos crudos (H), remojados (HR) y remojados + cocidos (HRC). Para obtener H, los granos fueron sometidos a una molienda directa con un molinillo (PE-MC9100, Peabody, Argentina). Para la obtención de HR y HRC, se siguieron los protocolos de remojo y cocción optimizados en el punto 1. Los porotos pretratados fueron congelados, liofilizados (Liofilizador LAB4C, Rificor, Argentina) y molidos (PE-MC9100, Peabody, Argentina) para la obtención de las harinas correspondientes. Cada una de las harinas obtenidas (H, HR, y HRC) fue tamizada empleando un tamiz número 40 (< 300 µm).

A las harinas se les determinó: i) composición (humedad, cenizas, proteínas, lípidos) mediante las metodologías AOAC (1984). El contenido de fibra dietaria total e insoluble se determinó con un kit enzimático (Megazime International Ltd., Irlanda). Los hidratos de carbono se calcularon por diferencia; ii) compuestos fitoquímicos (polifenoles, taninos y flavonoides) utilizando técnicas espectrofotométricas descriptas por Xu y Chang (2007); iii) capacidad antioxidante mediante las técnicas de inactivación de radicales libres DPPH y ABTS empleando el método QUENCHER (Gökmen y col., 2009).

3. Estudio de las propiedades espumantes del agua de cocción ("aquafaba")

Se prepararon espumas de aquafaba (AF) de porotos a distintas concentraciones de sólidos (1, 5, 10 y 20%) con una batidora de mano (Black and Decker, Argentina) durante 10 min. Para dichas espumas se estudió la cinética de desestabilización registrando el volumen de líquido drenado a lo largo del tiempo.

La cinética se modeló matemáticamente según la ecuación propuesta por Arzeni y col. (2012). Se incorporaron dos parámetros adicionales a la ecuación (Ecuación 1) que representan la proporción del volumen total de líquido (V_{AF}) que se incorpora inicialmente a la espuma (A), y la proporción del total de AF potencialmente drenable de la espuma (B).

$$\frac{V(t)}{V_{AF}} = A - \frac{Bt^n}{C+t^n} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

donde V(t) es el volumen de AF en la espuma en el tiempo t; n es una constante relacionada con la forma sigmoidea de las curvas; y C es una constante relacionada con el tiempo de drenado de la mitad del volumen potencialmente drenable a través de C^n.

Análisis estadístico

Los datos experimentales se informaron como promedios, dando entre paréntesis el error estándar de la media (SEM). El análisis de varianza (ANAVA) seguido del test de Tukey se

realizó utilizando el software de Infostat. Las diferencias en las medias, las pruebas F y los coeficientes de correlación de Pearson (R) para las relaciones entre parámetros se calcularon considerándolos significativos cuando P < 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Determinación de los tiempos de remojo y cocción

En la Figura 1a se muestra la capacidad de absorción de agua (CAA) de los granos a 20 ºC a lo largo del tiempo. La curva siguió un comportamiento del tipo “cóncavo hacia abajo”, mostrando una alta tasa inicial de absorción que disminuyó hasta alcanzar un equilibrio. Este resultado se encuentra en línea con lo observado por otros autores para porotos con morfología similar a la variedad Escarlata (*Red Kidney beans*) (Abu-Ghannam, 1998).

La cubierta de los granos de las leguminosas puede ser permeable o completamente impermeable al agua y de esto dependerá el comportamiento que seguirá su cinética de hidratación. Según Miano y col. (2018), el posible comportamiento de hidratación se divide en 3 etapas: la primera ocurre únicamente en los granos que tienen una cubierta impermeable; en este caso el agua entra a través del hilium, distribuyéndose luego al espacio entre la cara interna de la cubierta y el cotiledón. En la segunda etapa, una vez que la cubierta del grano se hidrata, se vuelve permeable al agua permitiendo también su ingreso por difusión. En la última etapa el cotiledón se hidrata por difusión y capilaridad dependiendo de la estructura y composición hasta alcanzar la humedad de equilibrio. Así, se define como comportamiento sigmoideo a la cinética de hidratación de los granos que atraviesan las tres etapas, mientras que al comportamiento de los granos que parten desde la segunda se lo llama “curva cóncava hacia abajo”. Observando la Figura 1a, a partir de la hora 8 la CAA no se modificó significativamente, mostrando un comportamiento asintótico. Por lo tanto, se definió que el tiempo adecuado de remojo era de 8 h.

En cuanto al tiempo de cocción, se estableció como objetivo cocinar los porotos hasta alcanzar una dureza de valor inferior a 3 N. Este valor se obtuvo a partir de la medida de la dureza en porotos comerciales remojados y cocidos durante tiempos previamente establecidos. Se graficó la dureza en función del tiempo de cocción (Figura 1b), obteniéndose una curva con tendencia logarítmica y pendiente negativa debido a que la dureza disminuyó al aumentar el tiempo de cocción. A partir de la curva logarítmica que se obtuvo, se definió como tiempo óptimo de cocción: 40 min. Tiempos de cocción similares fueron encontrados para diferentes porotos (Wani y col., 2017; Mkanda y col., 2007).

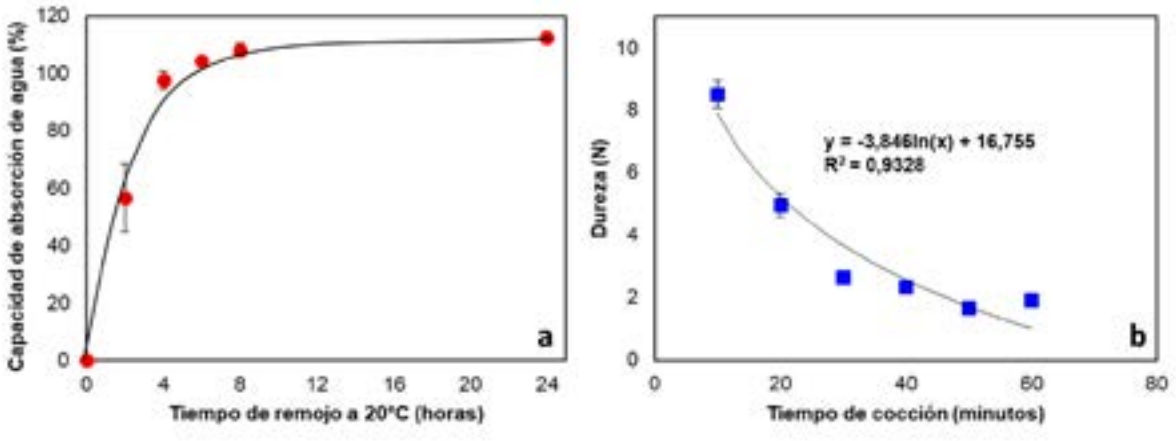


Figura 1. a) Cinética de hidratación de remojo de porotos variedad Escarlata; b) Dureza de porotos en función del tiempo de cocción (remojo: 8 h).

2. Caracterización nutricional y funcional de harinas

La composición proximal de las harinas se muestra en la Tabla 1. La harina de porotos crudos (H) resultó con mayor humedad, asociada con la molienda directa de granos sin un secado previo. Los menores valores obtenidos de este parámetro para las harinas de porotos

remojados (HR) y remojados + cocidos (HRC), fueron consecuencia de la liofilización antes de la molienda. Los resultados no mostraron prácticamente cambios en el contenido lipídico, manteniéndose por debajo de 1,6 g/100 g en todas las harinas. En cuanto al contenido de cenizas, no se encontraron diferencias entre H y HR ($P > 0,05$). Sin embargo, se observó una disminución significativa para HRC, debido a la lixiviación de minerales en el agua de cocción (Abbas y Ahmad, 2018), lo que podría conducir a una reducción del valor nutricional.

Respecto a H, el contenido de proteínas como así también de fibra dietaria total (FDT) e insoluble (FDI) no se vieron afectados por el remojo ($P > 0,05$), en concordancia con lo reportado por Pujolà y col. (2007). Sin embargo, dichos macronutrientes aumentaron con el proceso hidrotérmico (remojo + cocción) ($P < 0,05$). El mayor contenido de proteína para HRC podría atribuirse a la pérdida de sólidos solubles durante la cocción, lo que conduce a un efecto de concentración (Rebollo-Hernanz y col., 2019; Pujolà y col., 2007). Resultados similares fueron obtenidos por Wang y col. (2010), quienes observaron un aumento significativo en el contenido de proteínas para diferentes legumbres sometidas a un proceso de cocción. Para todas las harinas, se observó que la FDI era la fracción principal en la FDT, lo que está estrechamente relacionado con la reducción de la respuesta glucémica y, por tanto, beneficioso en términos nutricionales.

Por último, todas las harinas se destacaron por un alto contenido de hidratos de carbono, fracción que incluye mayoritariamente almidón (Ashogbon y col., 2021). Para el caso de HRC, el contenido de hidratos de carbono se redujo probablemente como consecuencia de la solubilización de algunos componentes (como los galacto-oligosacáridos) en el agua de cocción. En general, el tratamiento térmico promueve el aumento del diámetro de los poros de la cáscara de los porotos y la permeabilidad al agua, incrementando así la difusividad de los componentes (Ravoninjatovo y col., 2022).

Tabla 1. Composición proximal, compuestos fitoquímicos y capacidad antioxidante de harinas obtenidas a partir de porotos crudos (H) y de porotos pretratados por remojo (HR) y remojo + cocción (HRC).

Parámetro*	H	HR	HRC
Humedad (g/100 g)	$12,09^{c}$ (0,03)	$5,51^{b}$ (0,06)	$4,31^{a}$ (0,01)
Lípidos (g/100 g bs)	$1,56^{b}$ (0,01)	$1,282^{a}$ (0,007)	$1,59^{b}$ (0,02)
Cenizas (g/100 g bs)	$4,9^{b}$ (0,1)	$4,52^{b}$ (0,05)	$3,16^{a}$ (0,09)
Proteínas (g/100 g bs)	$22,4^{a}$ (0,1)	$22,2^{a}$ (0,1)	$24,03^{b}$ (0,03)
FDT (g/100 g bs)	$22,4^{a}$ (0,9)	$19,18^{a}$ (0,03)	$37,3^{b}$ (0,9)
FDI (g/100 g bs)	$17,6^{a}$ (0,3)	$17,4^{a}$ (0,2)	36^{b} (3)
H. de carbono (g/100 g bs)	48,67	52,83	33,92
Polifenoles totales (mg AGE/g bs)	11^{a} (1)	$11,4^{a}$ (0,6)	$11,6^{a}$ (0,5)
Taninos (mg CAE/g bs)	17^{b} (1)	$14,50^{b}$ (0,07)	$3,0^{a}$ (0,3)
Flavonoides (mg CAE /g bs)	$4,2^{b}$ (0,4)	$3,53^{b}$ (0,06)	$0,77^{a}$ (0,02)
Capacidad antioxidante			
Técnica DPPH (µmol TE/g bs)	1217^{c} (37)	971^{b} (59)	371^{a} (7)
Técnica ABTS (µmol TE/g bs)	1422^{b} (104)	1375^{b} (95)	466^{a} (35)

Abreviaturas: bs: base seca; FDT: Fibra dietaria total; FDI: Fibra dietaria insoluble. AGE: ácido gálico equivalentes; CAE: (+)-catequina equivalentes; TE; Trolox equivalentes

*Diferentes letras asignadas a valores en la misma fila indican diferencias significativas ($P < 0,05$) según el test de Tukey.

Los valores obtenidos para todos los compuestos fitoquímicos se muestran en la Tabla 1. La aplicación de pretratamientos a los porotos no afectó significativamente el contenido de polifenoles totales de las harinas resultantes ($P > 0,05$), lo que podría estar relacionado con un equilibrio de masa entre la liberación de algunos polifenoles por los pretratamientos y la pérdida de otros en las aguas de remojo y cocción.

Sin embargo, el tratamiento hidrotérmico (remojo + cocción) causó reducciones significativas tanto en el contenido de taninos como de flavonoides ($P < 0,05$). Ravoninjatovo y col. (2022) demostraron que el contenido de taninos puede (o no) modificarse dependiendo

del tiempo y/o la cantidad de agua utilizada en el remojo. Sin embargo, el proceso hidrotérmico podría: i) aumentar la permeabilidad de la cubierta del grano permitiendo la difusión de estos compuestos al agua, y/o ii) descomponer los polifenoles aromáticos de los taninos causando la formación de complejos insolubles con las proteínas, dificultando su cuantificación. Esto explicaría por qué no se observaron diferencias significativas en el contenido de taninos entre H y HR, mientras que hubo una disminución marcada para estos compuestos luego del tratamiento hidrotérmico. En cuanto a los flavonoides, Jiratanan y Liu (2004) reportaron una disminución significativa del contenido de flavonoides totales en porotos verdes (*Phaseolus vulgaris* L.), mientras que Akillioglu y Karakaya (2010) hallaron niveles más altos en los porotos remojados/cocidos comparado con los crudos.

Respecto a la capacidad antioxidante (CA) de las harinas (Tabla 1), se observó una reducción significativa tanto mediante la técnica de ABTS como DPPH en el orden H > HR > HRC ($P < 0,05$). Es importante destacar que el método empleado permite medir la CA tanto de los componentes extraíbles como de aquellos compuestos insolubles y ligados, reflejando la verdadera capacidad antioxidante de las harinas. Las diferencias encontradas podrían atribuirse a la presencia de compuestos fitoquímicos, tales como los polifenoles, flavonoides y taninos. Como no se observaron diferencias significativas para el contenido de polifenoles totales (Tabla 1), las diferencias en CA se atribuyeron principalmente a los cambios en los contenidos de flavonoides y taninos, registrándose correlaciones positivas entre dichas concentraciones y la CA medida por ambas técnicas ($P < 0,05$).

3. Estudio de las propiedades espumantes del agua de cocción ("aquafaba")

Las Figuras 2a y b muestran el satisfactorio ajuste de la Ec. 1 para la cinética de drenado de todas las espumas analizadas. El parámetro **A** fue igual a 1 para todas las espumas indicando que se incorporó la totalidad del líquido inicialmente, independientemente de la concentración de sólidos en el AF. Mientras tanto, al analizar el parámetro **B**, no mostró diferencias significativas a bajas concentraciones ($B_{1\%}=B_{5\%}=0,95$) indicando un alto porcentaje de líquido potencialmente drenable. Al incrementar la concentración, el valor absoluto de B fue disminuyendo ($B_{10\%}=0,8$; $B_{20\%}=0,65$), mostrando un aumento en la capacidad de retener el líquido en sus espumas.

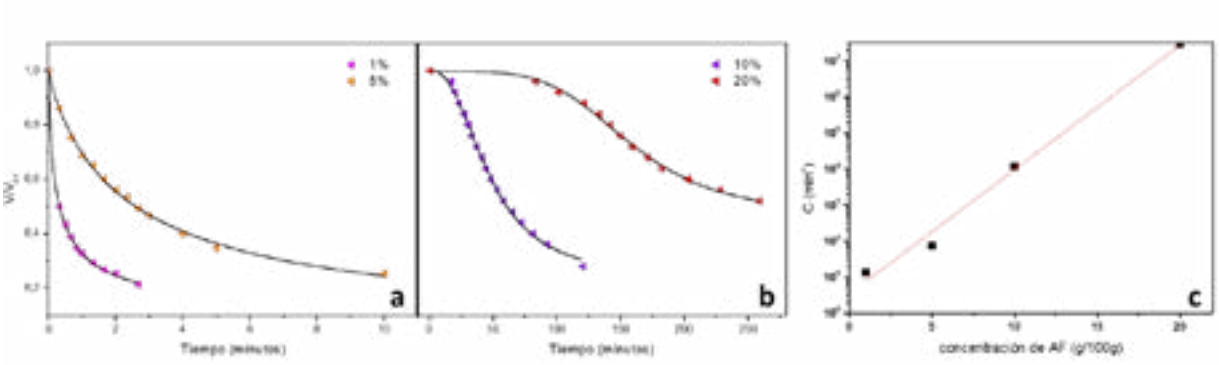


Figura 2. Cinética de desestabilización de espumas con aquafaba de a) 1 y 5% y b) 10 y 20%. c) dependencia del parámetro C (Ec. 1) con la concentración de sólidos en el AF.

Los valores obtenidos para el parámetro **C** mostraron una marcada dependencia con la concentración de AF reflejada en la Figura 2c. Este parámetro da indicio del tiempo en el cual las espumas drenan la mitad del líquido incorporado y está asociado directamente con la estabilidad. El parámetro adimensional **n**, asociado con la forma sigmoidea de las curvas, da cuenta de la fase LAG previa al inicio del drenado. Se observó un aumento significativo de este parámetro para las mayores concentraciones ($P < 0,05$), indicando que a mayor contenido de sólidos se retrasa el inicio de la desestabilización. El aumento en el contenido de sólidos implica un mayor contenido proteico en el AF, siendo las proteínas las encargadas de formar una película interfacial con una viscoelasticidad adecuada para retrasar el colapso de las burbujas.

CONCLUSIONES

Este trabajo subraya el potencial del poroto como producto alimentario y sus coproductos dentro de un enfoque de sostenibilidad productiva. Las harinas y su aquafaba no sólo promueven el aprovechamiento integral de los recursos, sino que también ofrecen soluciones viables y funcionales para la industria alimentaria, transformando lo que actualmente son residuos en oportunidades de valor agregado. Los distintos tratamientos aplicados sobre los granos permitieron obtener harinas con un perfil nutricional interesante y distintas propiedades funcionales dependiendo de los requerimientos de la industria y/o los consumidores.

BIBLIOGRAFÍA

Abbas, Y., & Ahmad, A. (2018). *Annals: Food Science & Technology*, 19(2).

Abu-Ghannam, N. (1998). *International Journal of Food Science and Technology*, 33(6), 509-515.

Akillioglu, H. G., & Karakaya, S. (2010). *Food Science and Biotechnology*, 19, 633-639.

AOAC (1984). Official Methods of Analysis (14° Ed.). Washington, DC.

ARZENI, C., PÉREZ E., O. & PILOSOF M. R., A. (2012). *Food Hydrocolloids*, 29, 308-316.

Ashogbon, A. O., Akintayo, E. T., Oladebeye, A. O., Oluwafemi, A. D., Akinsola, A. F., & Imanah, O. E. (2021). *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(17), 2938-2959.

Carbas, B., Machado, N., Oppolzer, D., Ferreira, L., Queiroz, M., Brites, C., Rosa, E.A.S, & Barros, A. I. (2020). *Antioxidants*, 9(2), 186.

Gökmen, V.; Serpen, A.; Fogliano, V. (2009). *Trends in Food Science & Technology*, 20 (6), 278−288.

Jiratanan, T., & Liu, R. H. (2004). *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(9), 2659-2670.

MAGYP 2021. Producción de legumbres en Argentina. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/magyp_informe_legumbres_julio_2021.pdf.

Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 352-370.

Mkanda, A.V., Minnaar, A., Kock, H. (2007). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 2868–2879.

Murray, B. S., & Ettelaie, R. (2004). *Current opinion in colloid & interface science*, 9(5), 314-320.

Pujolà, M., Farreras, A., & Casañas, F. (2007). *Food chemistry*, 102(4), 1034-1041.

Ravoninjatovo, M., Ralison, C., Servent, A., Morel, G., Achir, N., Andriamazaoro, H., & Dornier, M. (2022). *Legume Science*, 4(4), e143.

Rebollo-Hernanz, M., Martín-Cabrejas, M. & Aguilera, Y. (2019). In Legumes: Nutritional Quality, Processing and Potential Health Benefits; The Royal Society of Chemistry, pp 215−234.

Sharan, S., Zanghelini, G., Zotzel, J., Bonerz, D., Aschoff, J., Saint-Eve, A., & Maillard, M. N. (2021). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 20(1), 401-428.

Stantiall, S. E., Dale, K. J., Calizo, F. S., & Serventi, L. (2018). *European Food Research and Technology*, 244, 97-104.

Wang, N., Hatcher, D. W., Tyler, R. T., Toews, R., & Gawalko, E. J. (2010). *Food Research International*, 43(2), 589-594.

Wani, I. A., Sogi, D. S., Wani, A. A., & Gill, B. S. (2017). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 7-15.

Xu, B. J., & Chang, S. K. (2007). *Journal of food science*, 72(2), S159-S166.

EFECTO DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN SOBRE LA AUTOTERMICIDAD DEL PROCESO CLR PARA PRODUCIR H_2 EMPLEANDO $NiWO_4$ COMO TRANSPORTADOR DE OXÍGENO

López van der Horst, Juliana; Pompeo, Francisco

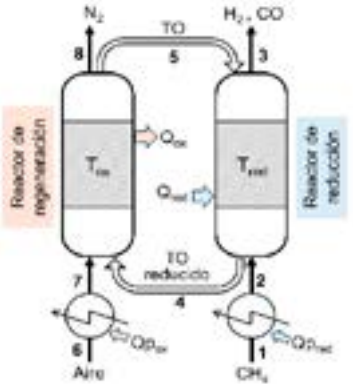
Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 50 Nº 184, La Plata, Argentina.
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA), Calle 47 Nº 257, La Plata, Argentina.
email: juliana.lopez@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El chemical looping reforming (CLR) ofrece una ruta alternativa para la producción de hidrógeno a partir del reformado de metano, evitando el contacto directo entre el combustible y el oxidante gaseoso. En su lugar, emplea un óxido metálico sólido como portador de oxígeno, que a través de su reducción permite la obtención de gas de síntesis en el reactor de combustible. Posteriormente, el sólido agotado se recupera en el reactor de regeneración utilizando diferentes agentes oxidantes, como aire o agua, para luego ser recirculado a la primera etapa, cumpliendo así un proceso cíclico [1]. De esta manera el proceso combina una etapa endotérmica (reactor de reducción) y una exotérmica (reactor de regeneración), con el potencial de evitar el aporte externo de energía, permitiendo operar de manera autotérmica [2]. Esto representa una ventaja significativa respecto al reformado convencional de metano, donde las altas temperaturas de reacción se logran mediante fuentes externas de energía.
En este trabajo, se analizó el desempeño del $NiWO_4$ como sólido transportador de oxígeno, de manera de identificar los rangos de temperatura de cada reactor y las relaciones de reactivos que optimicen el rendimiento del proceso, considerando tanto la producción de hidrógeno, como el balance energético. Para esto, en primer lugar, se llevó a cabo un análisis termodinámico que permitió determinar las composiciones de equilibrio y luego, junto con los balances de energía, se evaluó el efecto de las condiciones de reacción.
El marco termodinámico desarrollado y los resultados obtenidos representan un límite teórico dado que este enfoque no considera limitaciones cinéticas, de transporte, ni la degradación química o mecánica del material. Sin embargo, comprender este límite es valioso, ya que establece una base para identificar las condiciones que pueden mejorar el rendimiento del proceso y establece un valor máximo que puede alcanzarse optimizando ciertos parámetros operativos.

Metodología

El esquema de reacción CLR puede representarse como un conjunto de dos reactores que operan de manera isotérmica: el reactor de reducción a T_{red} y el reactor de oxidación a T_{ox}, de manera independiente (Esquema 1). Cada uno de estos reactores incorpora una etapa de precalentamiento, que permite que las corrientes gaseosas de alimentación (corrientes 1 y 6) alcancen la temperatura de reacción especificada. Qp_{red} representa el calor necesario para llevar el CH_4 a la temperatura del reactor de reducción, mientras que, Qp_{ox} denota el calor necesario para llevar el aire a la temperatura de oxidación. En esta configuración, el reactor de reducción (o de combustible) requiere del aporte de un calor Q_{red} dado que allí tiene lugar la reacción endotérmica entre el transportador de oxígeno (corriente 5) y el CH_4 (corriente 2). Este paso da lugar a dos corrientes: una gaseosa, en la que los



Esquema 1. Configuración CLR.

productos primarios son H_2 y CO (corriente 3), y una de productos sólidos que contiene el TO agotado (corriente 4). La segunda etapa de reacción tiene lugar en el reactor de oxidación, donde el TO reducido se regenera a partir de un oxidante (corriente 7), constituido en este caso por aire. Dada la naturaleza exotérmica de la reacción de oxidación, en esta etapa se genera el calor Q_{ox}. Los productos de reacción se dividen en dos corrientes: una sólida de TO regenerado que se recircula al reactor de reducción, y otra gaseosa conteniendo principalmente N_2.

En primer lugar, empleando el método de minimización de la energía libre de Gibbs se determinaron las composiciones de las corrientes de productos para las diferentes condiciones de reacción estudiadas. Este enfoque se basa en la premisa de que un sistema a presión y temperatura constantes disminuirá su energía libre de Gibbs total hasta alcanzar un valor mínimo en el equilibrio [3]. De esta manera, asumiendo que se alcanza el equilibrio en cada reactor, este método permite determinar las composiciones de las corrientes de salida, sin necesidad de definir reacciones específicas. Sin embargo, para esto es necesario definir previamente las especies que podrían estar presentes en el equilibrio y las cantidades iniciales de las mismas. Para la reacción de reducción del $NiWO_4$ por el CH_4, se consideraron para la fase gaseosa H_2, CO, CO_2, H_2O y CH_4, y para la fase sólida $NiWO_4$, W, Ni, NiO, WO_2, WO_3 y C [4].

Las variables analizadas en este estudio fueron la temperatura de reacción y la relación molar de reactivos. Para el reactor de reducción, la temperatura se modificó en el rango 500-1000°C y la relación de reactivos CH_4:$NiWO_4$, se modificó de 4:0,50 a 4:1,50, donde 4:1 representa la relación estequiométrica, definida de acuerdo a la reacción principal que tiene lugar en dicho reactor para dar gas de síntesis y el óxido reducido (Ecuación 1).

$$4CH_4 + NiWO_4 \rightleftarrows 8H_2 + 4CO + W + Ni \quad (1)$$

En base a los resultados de esta etapa, se seleccionaron las condiciones que no condujeron a la formación de carbón, para posteriormente realizar la regeneración del TO en el reactor de oxidación. De esta manera, se definieron las especies O_2 y N_2 para la fase gaseosa, en tanto que, para la fase sólida, se consideraron a los metales y sus óxidos: W, Ni, NiO, WO_2, WO_3 y $NiWO_4$. En esta etapa, la reacción principal consiste en la oxidación de los metales reducidos a partir del oxígeno presente en la corriente de aire, para obtener nuevamente $NiWO_4$, como indica la Ecuación 2.

$$W + Ni + 2\,O_2 \rightarrow NiWO_4 \quad (2)$$

En consecuencia, la cantidad del agente oxidante se modificó en ± 10%, ± 20% y ± 30% con respecto a la estequiométrica O_2:Ni/W=2:1. De igual manera que en el reactor de reducción, la temperatura se varió en el rango 500-1000°C. A partir de los resultados de esta etapa, solo se seleccionaron para el análisis posterior aquellas condiciones que permitieron la regeneración completa del $NiWO_4$.

Con el objetivo de obtener los calores intercambiados en el proceso, se plantearon los balances de energía, estableciéndose que las corrientes gaseosas de alimentación de CH_4 y aire se suministran a una temperatura de 25°C. Luego, la introducción de una etapa de precalentamiento previa a cada reactor permite que las mismas alcancen la temperatura de reacción especificada, la cual se corresponde también con la de las corrientes efluentes. Por lo tanto, para la etapa de reducción, se cumple que $T_{red}=T_2=T_3=T_4$, mientras que para la etapa de oxidación, $T_{ox}=T_7=T_8=T_5$.

Los calores intercambiados en los reactores (Q_{red} y Q_{ox}) y en cada etapa de precalentamiento (Qp_{red} y Qp_{ox}) se calcularon mediante los balances de energía, en función de las entalpías de las corrientes de entrada y salida. Luego, la entalpía de cada corriente se determinó en función de las especies que la conforman y de la temperatura (Ecuación 3), donde la entalpía de cada especie se evalúa a partir de la Ecuación 4, siendo la referencia compuesto puro a 25°C y 1 atm.

$$Q = H_s - H_e = \sum_i n_{s,i}\, h_{s,i} - \sum_i n_{e,i}\, h_{e,i} \quad (3)$$

$$h_i = \Delta h^s_{f,i} + \int_{T^s}^{T} cp_i\, dT \quad (4)$$

En resumen, el balance energético para todo el sistema puede expresarse mediante la ecuación 5, donde Q_{CLR} representa el calor neto del proceso.

$$Q_{CLR} = Q_{red} + Q_{ox} + Q_{p_{red}} + Q_{p_{ox}} \quad (5)$$

En este contexto, dado que durante el proceso se consume energía (Q>0) en las etapas de precalentamiento y en el reactor de reducción, para satisfacer el balance térmico y evitar el aporte externo de energía, el calor generado en el reactor de regeneración (Q<0) debe ser suficientemente elevado, de manera que $Q_{CLR} \leq 0$.
Así, para determinar las condiciones de reacción que permiten que el sistema funcione de manera autotérmica, se determinó cada flujo de calor a partir de las ecuaciones 3 y 4 y, a continuación, se analizó el efecto de las diferentes variables sobre el calor neto Q_{CLR}.

Resultados y discusión

En primer lugar, se determinaron las composiciones de cada corriente mediante los cálculos del equilibrio para cada una de las condiciones de reacción definidas. La Figura 1 muestra la distribución de productos obtenida en el reactor de reducción para la relación CH_4:$NiWO_4$=4:1 en función de la temperatura.

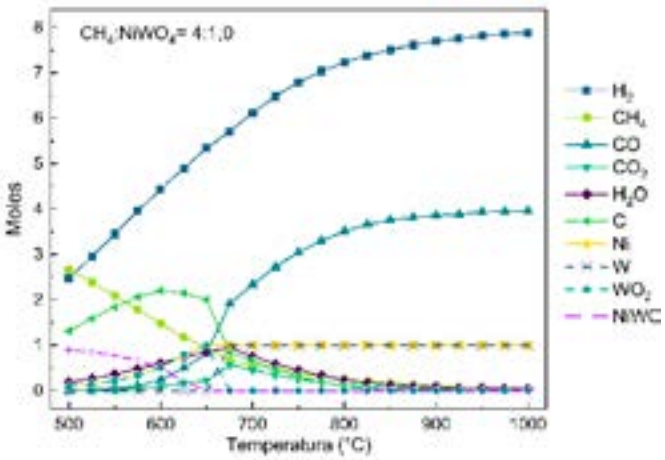


Figura 1. Distribución de productos en el reactor de reducción para una relación CH_4:$NiWO_4$ = 4:1,0.

Como es de esperar, la conversión de CH_4 aumenta con la temperatura debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones [5,6]. Los máximos valores de conversión de CH_4 se obtienen para relaciones superiores a la estequiométrica, alcanzando la conversión completa a 825°C. Por otra parte, una temperatura de reducción elevada favorece la conversión de $NiWO_4$, alcanzando la conversión completa del material a 675°C y la formación de productos sólidos más reducidos. En todo el rango de temperaturas se observa Ni^0, mientras que el W^{6+} se reduce a WO_2 a bajas temperaturas y la reducción completa a W^0 sólo se produce por encima de 700°C [4].
En cuanto a la formación de carbón, esta es significativa en la mayoría de las condiciones estudiadas (Figura 2), especialmente cuando no hay suficiente TO y a bajas temperaturas, donde la oxidación del combustible no tiene lugar sustancialmente y en cambio ocurre la descomposición térmica del CH_4 para producir H_2 y C [7,8]. Se observa un máximo en el rendimiento a carbón a temperaturas entre 600 y 650°C, alcanzando un 55% asociado a una conversión de CH_4 del 63%. En el caso de las relaciones por debajo de la estequiométrica, se observa formación significativa de carbón en todo el intervalo de temperaturas. Por el contrario, para relaciones superiores a la estequiométrica no se observa carbón por encima de 700°C, mientras que para la relación 4:1 esto ocurre a partir de 875°C. En resumen, se observa que a medida que aumenta la conversión del TO, junto con el aumento de la selectividad hacia las especies más reducidas, disminuye la cantidad de carbón formado debido a que el oxígeno presente en el TO pasa a formar parte de los productos de oxidación, produciendo principalmente CO. Sin embargo, al aumentar la cantidad de TO, se observa una mayor formación de CO_2 debido a reacciones de oxidación total.
Respecto al rendimiento a H_2 (Figura 3), se observa que para la relación estequiométrica éste aumenta con la temperatura en todo el intervalo, mientras que en exceso de TO, el rendimiento a H_2 presenta un valor máximo a partir del cual permanece aproximadamente constante o disminuye al aumentar la temperatura. Esto se corresponde con la formación de productos de oxidación total (H_2O), a causa de la mayor disponibilidad de oxígeno, lo que conlleva una disminución de la selectividad hacia el H_2. Se comprueba que la relación

estequiométrica entre reactivos permite alcanzar el máximo rendimiento a H_2, y en estas condiciones, esto se ve favorecido por las altas temperaturas de reacción, obteniéndose un valor del 98% a 1000°C, mientras que a la misma temperatura, para 1,25 y 1,5 moles de $NiWO_4$, el rendimiento disminuye hasta el 90% y el 81%, respectivamente.

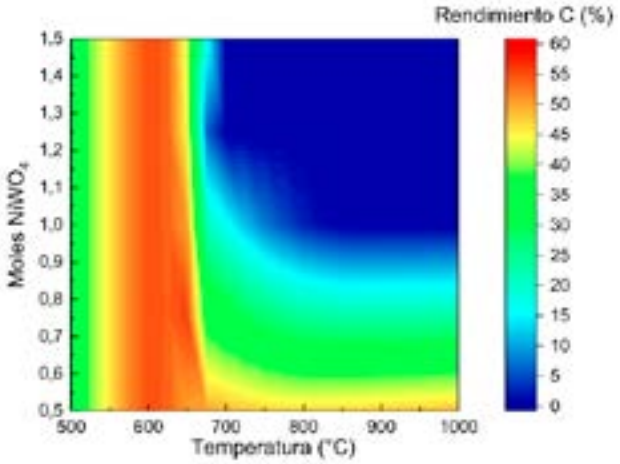


Figura 2. Rendimiento a carbón.

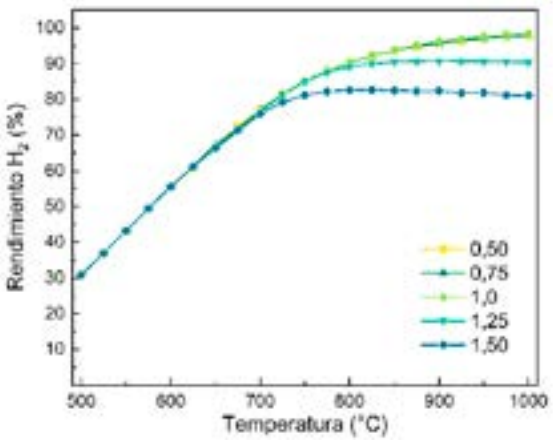


Figura 3. Rendimiento a H_2.

En cuanto a la etapa de regeneración, se realizaron cálculos de equilibrio para las diferentes composiciones obtenidas de la etapa anterior para la corriente 4, considerando únicamente aquellas condiciones en las que no se formó carbón. Específicamente, se evaluó la relación molar 4:1 en el rango de 875 a 1000 °C y las relaciones 4:1,25 y 4:1,5 en el rango de 700 a 1000 °C. Bajo dichas condiciones, la conversión de $NiWO_4$ fue completa, obteniéndose W y Ni como productos reducidos. Los resultados de la regeneración muestran que, tanto el porcentaje de TO regenerado como la distribución de productos obtenidos, son independientes de la temperatura y que el uso de cantidades estequiométricas de O_2 permiten la regeneración completa del $NiWO_4$. Por el contrario, en déficit de O_2, tanto el porcentaje de TO regenerado como la distribución de productos dependen de la cantidad de O_2 empleada, como se muestra en la Figura 4. Dado que un exceso de aire en la etapa de precalentamiento implica una mayor demanda de calor y, en consecuencia, afecta negativamente el balance energético, se estableció que la cantidad de aire suministrada al reactor de oxidación debía ser la mínima necesaria para lograr la regeneración completa, es decir, la cantidad estequiométrica definida por la Ecuación 2.

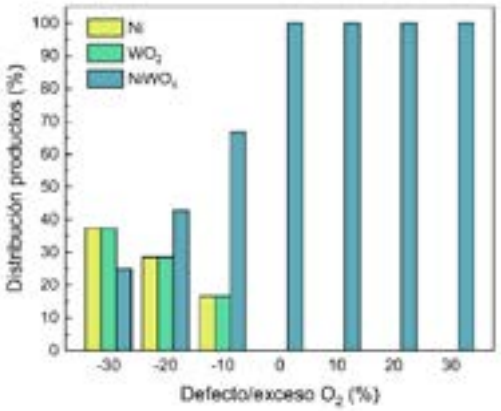


Figura 4. Distribución de productos de la regeneración del $NiWO_4$ agotado.

Al momento de evaluar el rendimiento de un determinado TO y del proceso CLR debe tenerse en cuenta, tanto el rendimiento a hidrógeno, como el balance energético del proceso. Con este fin, en base a los resultados obtenidos para las corrientes de productos, se determinó el calor implicado en cada etapa del proceso a través de las ecuaciones 3 y 4.

Dado que la cantidad de CH_4 se fijó en 4 moles, Qp_{red} sólo es función de la temperatura de reacción, por lo que valores más altos de T_{red} conducen a un aumento del mismo. Por el contrario, Qp_{ox} depende tanto de la temperatura de reacción T_{ox} como de la cantidad de $NiWO_4$ analizada, ya que una mayor cantidad de TO reducido, requiere de más aire para su regeneración, aumentando así Qp_{ox}.

El calor requerido en la etapa de reducción se obtuvo para las diferentes condiciones de T_{red}, T_{ox} y moles de $NiWO_4$ (Figura 5). Se observó un aumento del calor requerido al aumentar T_{red}, dado que esta etapa está dominada por reacciones endotérmicas que se ven favorecidas al aumentar la temperatura. Por el contrario, un aumento de la temperatura de oxidación reduce

la demanda externa de energía, ya que esto se traduce en un mayor aporte energético a través del sólido proveniente del reactor de oxidación. Por último, una mayor cantidad de TO se correlaciona directamente con una mayor demanda de energía como resultado de las mayores conversiones alcanzadas en este reactor. A continuación, se determinó el calor generado en la etapa de regeneración por la reacción exotérmica de oxidación del TO agotado (Figura 6). Siendo este calor directamente proporcional a la cantidad de $NiWO_4$ reducido, los casos con mayor cantidad de moles del TO, implican un valor más elevado de Q_{ox}. Por el contrario, se observa una ligera disminución en Q_{ox} al aumentar T_{ox} debido a la reducción del ΔH_r de la reacción a temperaturas más elevadas. Por el contrario, T_{red} tiene un efecto despreciable sobre Q_{ox}.

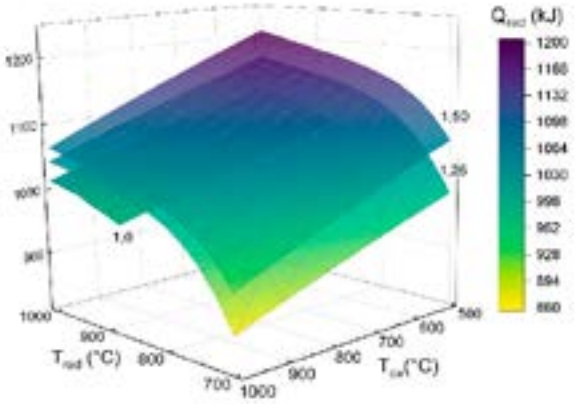


Figura 5. Calor requerido en el reactor de reducción.

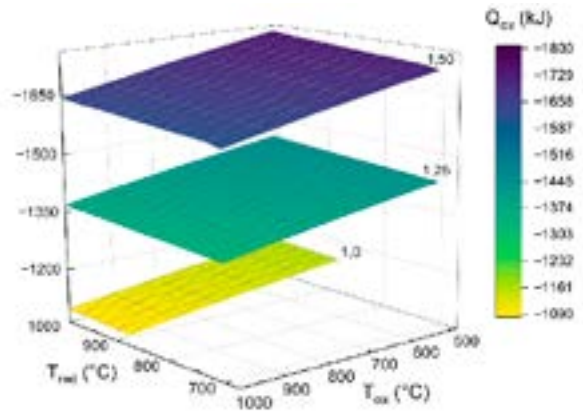


Figura 6. Calor generado en el reactor de oxidación.

Finalmente, el calor neto Q_{CLR} se calculó considerando el balance global del sistema utilizando la Ecuación 5. La Figura 7 muestra el Q_{CLR} en función de las temperaturas de reducción y de oxidación, correspondiendo cada plano a un número específico de moles de $NiWO_4$. Además, se incluyó un plano gris en Q_{CLR}=0, correspondiente a la condición autotérmica. Valores positivos de Q_{CLR} indican que el calor generado por la oxidación es insuficiente para satisfacer el balance térmico, requiriendo del aporte externo de energía, mientras que valores de Q_{CLR} más negativos evidencian que el calor generado excede el requerido por el resto de las etapas del proceso. Se observa que el aumento en los moles de $NiWO_4$ tienen un efecto positivo en el sistema, ya que esto se traduce en un mayor transporte de energía por parte del sólido desde el reactor de oxidación hacia el de reducción [2]. Por otra parte, bajas temperaturas de reacción favorecen la autotermicidad ya que, por un lado, implican un menor consumo de energía para precalentar las corrientes de aire y CH_4. Además, al disminuir T_{red}, se reduce Q_{red} debido a la menor conversión asociada a las reacciones endotérmicas de reducción. Por último, menor T_{ox} resulta en una mayor liberación de calor durante la reacción de regeneración, debido al valor más negativo de ΔH_r a temperaturas más bajas. Aunque se advirtió que al disminuir T_{ox} aumenta significativamente el calor requerido en el reactor de reducción (Figura 5), la menor demanda de energía para precalentar la corriente de aire (Qp_{ox}) tiene un mayor impacto en el balance energético global, lo que resulta en un efecto neto positivo y, en consecuencia, en un valor más negativo de Q_{CLR}.

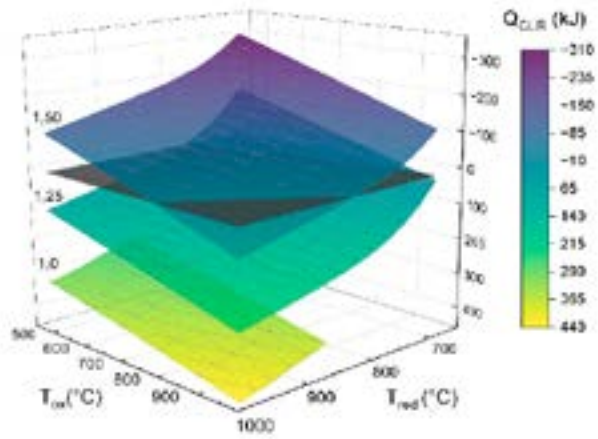


Figura 7. Calor neto del esquema CLR.

A partir de los resultados se deriva que para operar de manera autotérmica es necesario que la relación CH_4:$NiWO_4$ se encuentre por encima de la proporción estequiométrica. Además, al comparar los planos correspondientes a 1,25 y 1,5 moles de $NiWO_4$, se observa que el primero

requiere de temperaturas de reacción más bajas y por lo tanto el rango de operación es más acotado.
De este análisis es posible establecer que existe una relación de compromiso entre la producción de H_2 y el rendimiento energético ya que las condiciones que favorecen el rendimiento térmico no coinciden con las que maximizan el rendimiento a H_2. El máximo rendimiento a H_2 del 98% se obtiene para la relación CH_4:$NiWO_4$=4:1, lo que indica que el funcionamiento autotérmico no sería viable bajo esta condición. Si bien, mayores cantidades de $NiWO_4$ mejoran el transporte de energía entre los reactores de reducción y oxidación, permitiendo obtener un Q_{neto} máximo de -309 kJ para la relación CH_4:$NiWO_4$=4:1,50 para T_{red}=700°C y T_{ox}=500°C, esto impacta negativamente en el rendimiento a H_2, que disminuye a 76%, dado que el exceso de $NiWO_4$ favorece la reacción de oxidación total, produciendo H_2O a expensas del H_2. Además, respecto a la temperatura, el rendimiento a H_2 presenta el máximo a ~800°C, dado que menores temperaturas conducen a una conversión reducida de CH_4. Bajo condiciones autotérmicas, el máximo rendimiento a H_2 obtenido es del 88%, correspondiente a una relación CH_4:$NiWO_4$=4:1,25 y T_{red}=775°C, con una conversión de CH_4 del 97%. Esto, junto con una T_{ox}=500°C da como resultado un valor de Q_{CLR}= -18 kJ.

Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el rendimiento termodinámico del $NiWO_4$ como portador de oxígeno en el CLR para la producción de hidrógeno. Los resultados demostraron que la formación de carbón se ve desfavorecida con relaciones molares superiores a la estequiométrica, mientras que, proporciones estequiométricas permiten un mayor rendimiento a H_2, alcanzando un máximo del 98% a 1000°C. En la etapa de regeneración, no se observaron modificaciones en las composiciones al variar la temperatura, lográndose la regeneración completa del $NiWO_4$ en todo el rango estudiado al emplear cantidades estequiométricas de aire. El análisis del balance energético demostró que menores temperaturas de reacción y mayores cantidades de TO promueven el funcionamiento autotérmico, lo cual va en detrimento del rendimiento a hidrógeno. En conclusión, alcanzar condiciones autotérmicas requiere compromisos en el rendimiento a H_2, ya que maximizar su producción puede implicar la necesidad de aportar calor de manera externa.
En última instancia, el desarrollo de portadores de oxígeno eficaces requiere una comprensión interdisciplinar de la ciencia de los materiales y la ingeniería de reacción. Además, la validación experimental sigue siendo indispensable para tener en cuenta las limitaciones cinéticas, los efectos de difusión, los retos operativos prácticos y la estabilidad de los materiales a lo largo del tiempo.

Bibliografía

[1] A. Shafiefarhood, J.C. Hamill, L.M. Neal, F. Li, Phys. Chem. Chem. Phys. 17 (2015) 31297–31307.
[2] M. Ortiz, A. Abad, L.F. De Diego, F. García-Labiano, P. Gayán, J. Adánez, Int. J. Hydrogen Energy 36 (2011) 9663–9672.
[3] J. López van der Horst, F. Pompeo, Next Sustain. 3 (2024) 100033.
[4] J.A. Bustnes, D. Sichen, S. Seetharaman, Scand. J. Metall. 29 (2000) 151–155.
[5] J. Adanez, A. Abad, F. Garcia-Labiano, P. Gayan, L.F. De Diego, Prog. Energy Combust. Sci. 38 (2012) 215–282.
[6] M.N. Khan, T. Shamim, Int. J. Hydrogen Energy 42 (2017) 15745–15760.
[7] E. Jerndal, T. Mattisson, A. Lyngfelt, C. Combustion, O. After, Chem. Eng. Res. Des. 84 (2006) 795–806.
[8] K.S. Kang, C.H. Kim, K.K. Bae, W.C. Cho, S.H. Kim, C.S. Park, Int. J. Hydrogen Energy 35 (2010) 12246–12254.

ESTUDIOS DE LA INHIBICIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO POR EFECTO DEL COMPUESTO PRECIPITADO A PARTIR DE EXTRACTO DE MENTA Y $Ca(NO_3)_2$

D´Alessandro Oriana(1,2); Byrne Christian(1,2); Deyá Cecilia(2,3)*

(1) Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, Buenos Aires, Argentina.
(2) CIDEPINT (CICPBA-CONICET-Fac. de Ingeniería, UNLP)
(3) Facultad de Ingeniería, UNLP, Buenos Aires, Argentina.

*Correo electrónico (autor de contacto): c.deya@cidepint.ing.unlp.edu.ar

Introducción

Las pinturas son dispersiones de un sólido o mezcla de sólidos finamente divididos en un medio fluido denominado vehículo (material formador de película, o resina, y solvente) [1] y son un método de bajo costo, fácil aplicación y mantenimiento para la protección anticorrosiva de metales. Esta protección se logra con la adición, entre los sólidos, de un pigmento anticorrosivo, que es el compuesto capaz de proteger el metal de la acción del agua, O_2, ácidos, y otros agentes agresivos.

Las pinturas anticorrosivas funcionan en una primera etapa como una barrera frente a la entrada de agua y electrolitos, pero no son totalmente impermeables, ya que la segunda etapa de la protección depende de la solubilidad en agua del pigmento anticorrosivo. A medida que el agua atraviesa la pintura va disolviendo el pigmento anticorrosivo, que difunde hacia la superficie metálica donde forma una película protectora. Es por esto que la pintura anticorrosiva se coloca, en general, directamente sobre el metal y en espesores relativamente bajos. Por otro lado, los pigmentos anticorrosivos deben tener muy baja solubilidad en agua a fin de evitar su lixiviación excesiva.

Los inhibidores de corrosión tradicionales en pinturas, como el tetroxicromato de cinc y el fosfato de cinc, han sido objeto de crecientes cuestionamientos ambientales y toxicológicos. Esto ha impulsado la investigación y el desarrollo de alternativas más seguras y sostenibles. Entre estas surgieron varios compuestos inorgánicos como vanadatos [2], pigmentos intercambiadores de iones (zeolitas intercambiadas con iones de tierras raras) [3-5]; compuestos híbridos como “tanatos” de La(III), de Zn(II) [6-7]; e inhibidores orgánicos encapsulados [8].

Los inhibidores orgánicos son compuestos con actividad anticorrosiva, que, por su alta solubilidad, no pueden agregarse en forma aislada o como único compuesto activo en las pinturas. La acción protectora se debe a su adsorción sobre el metal mediante interacciones entre los heteroátomos (S, O, N) y anillos aromáticos, presentes en la molécula del inhibidor, y la superficie metálica. Como resultado de esta interacción se genera una película protectora, aislante y uniforme, que disminuye la velocidad de corrosión [8]. Las plantas son una fuente importante de estos compuestos orgánicos ya que contienen polifenoles (ácidos fenólicos, taninos, flavonoides, terpenoides, etc.) que han demostrado ser efectivos contra la corrosión [9-10]. Esto ha impulsado el estudio de extractos de vegetales como de romero (*Rosemarinus officinalis L.),* tomillo, aloe vera, rábano (*Raphanus sativus*) [11-16]. La ventaja que presentan los extractos acuosos o hidroalcohólicos conteniendo estos compuestos inhibidores es que pueden emplearse como solventes de las pinturas, sin aislar el principio activo, considerando la posibilidad de sinergismo entre los diferentes componentes del extracto y la presencia de posibles inhibidores en muy baja concentración y de difícil aislamiento. La desventaja que presentan es que, por su degradabilidad, no tienen una larga vida útil.

Este trabajo tuvo como objetivo precipitar los componentes presentes en un extracto acuoso de *Mentha aquatica* L. con una sal de Ca(II) para obtener así un compuesto Ca-menta, de baja solubilidad y larga vida útil.

Parte Experimental

Hojas de *Mentha aquatica* L. se secaron en estufa a 40ºC durante 1 semana y luego se molieron hasta obtener un polvo fino. Veinte gramos de este polvo se pusieron en contacto con 400 mL de agua destilada a 70 ºC con agitación constante. Transcurridas 2 h se detuvo la agitación y se dejó enfriar hasta el día siguiente. El sobrenadante fue separado mediante filtración con embudo Butchner y papel de filtro cinta blanca. Finalmente, se le reguló el pH a un valor de 7,0 con pH-metro y se llevó a 500,00 mL con agua destilada en un matraz adecuado.

Por otro lado, 165,2 g de $Ca(NO_3)_2 \cdot 4\ H_2O$ se disolvieron en agua destilada (pH de la solución 7,8, alcalinizada con NaOH 0,1 M) y se llevaron a un volumen final de 500,0 mL en un matraz. Finalmente, se agregó la solución de $Ca(NO_3)_2$, gota a gota desde ampolla de decantación, a un vaso de precipitados con el extracto acuoso, con agitación contante. A la suspensión obtenida se le ajustó el pH a un valor de 7,0 con NaOH y se dejó decantar durante la noche. El precipitado obtenido se filtró con papel de filtro banda azul y se secó a 50ºC en estufa. El sólido Ca-menta se caracterizó mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para determinar la presencia de grupos orgánicos y compararlo con el espectro del residuo seco del extracto de menta (obtenido por secado a 105ºC).

A fin de realizar ensayos electroquímicos (medidas de potencial de corrosión y realización de curvas de polarización lineal y en modo Tafel), en función del tiempo, 0.3 g del precipitado se suspendieron en 250 mL de una solución de NaCl 0,1M utilizada como electrolito. El potencial de corrosión de cilindros de acero SAE 1010 inmerso en la suspensión se midió durante 5 h frente a un electrodo de Ag/AgCl. En el caso de las curvas de polarización, realizadas luego de 2, 5 y 24 h de inmersión, se emplearon celdas de 3 electrodos con acero SAE 1010 como electrodo de trabajo (A = 0,28 cm^2), electrodo de Ag/AgCl como electrodo de referencia y un alambre de Pt como contraelectrodo. Las resistencias a la polarización se obtuvieron a partir de la pendiente de las rectas de E vs J obtenidas de las curvas de polarización lineal realizadas en un rango de potencial de ± 10 mV a partir del potencial a circuito abierto. Las curvas en modo Tafel, curvas log J vs E, se realizaron empleando la misma celda anterior, con un rango de barrido de ± 250 mV a partir del potencial a circuito abierto.

Resultados y discusión

El espectro FTIR del sólido Ca-menta mostró bandas intensas de transmitancia a 1016, 2904 y 3332 cm^{-1}, a diferencia del residuo seco del extracto de menta que presentó bandas a 1045, 1405, 1575, 2975 y 3302 cm^{-1}. Estas diferencias indican que no todos los componentes del extracto fueron precipitados con el agregado de la sal de Ca(II). Las bandas a 1016, 2904 y 3302 cm^{-1} indican la presencia de enlaces C-C alifáticos y aromáticos y la presencia de grupos OH en el precipitado Ca-menta [17].

Los resultados mostraron que en presencia del precipitado Ca-menta el potencial de corrosión del acero se desplaza unos 150 mV hacia valores más positivos con respecto al potencial obtenido en una solución 0,1 M de NaCl utilizada como blanco (Figura 1) y que esta diferencia aumenta al transcurrir el tiempo. Mientras que el potencial de corrosión del acero inmerso en la solución blanco se desplaza hacia valores más negativos en forma continua, el potencial del metal inmerso en la suspensión con Ca-menta se mantiene en valores cercanos a -285 mV a partir de los 70 min de ensayo y hasta finalizar el mismo.

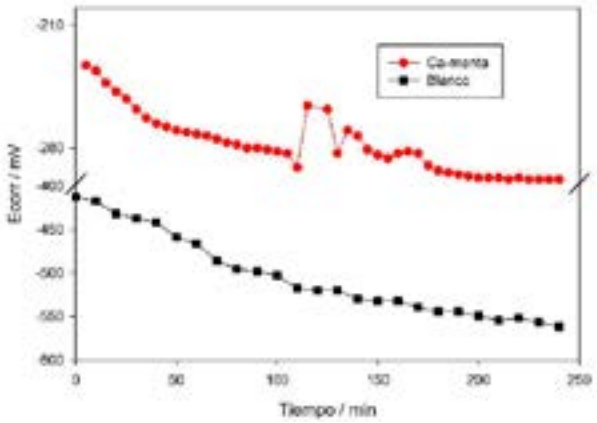


Figura 1. Potencial de corrosión (Ecorr) en función del tiempo de inmersión de acero SAE 1010 en la suspensión de Ca-menta en NaCl 0,1 M (rojo) y en NaCl 0,1M (negro).

En la Figura 2 se muestran las curvas de polarización lineal obtenidas. Las pendientes de las rectas E vs J dan las resistencias a la polarización, es decir dan una idea de que tan impedida están las reacciones anódica y catódica sobre el electrodo, y están inversamente relacionadas con la velocidad a la que ocurren dichas reacciones.

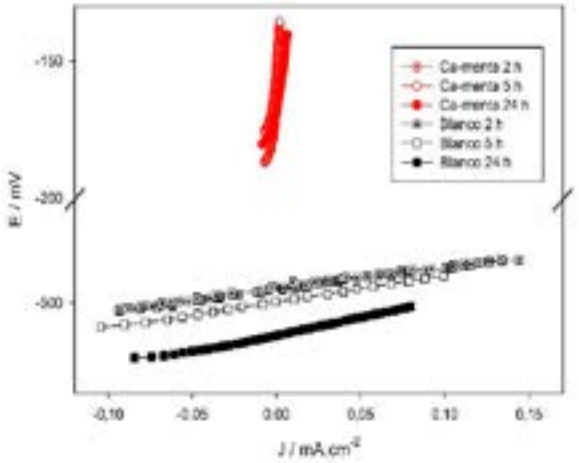


Figura 2. Curvas de polarización lineal sin compensación por caída óhmica luego de 2, 5 y 24 h de inmersión del acero SAE 1010 en la suspensión de Ca-menta en NaCl 0,1 M (rojo) y en NaCl 0,1M (negro).

La determinación de la resistencia a la polarización a partir de las pendientes de las rectas mostró un aumento de más de un orden de magnitud para todos los tiempos, como puede observarse en la Tabla 1. En presencia del sólido Ca-menta, la velocidad de corrosión ocurre mucho más lentamente que en el caso del blanco, alargando la vida útil del metal inmerso en la solución de NaCl 0,1M.

Tabla 1. Valores de resistencia a la polarización sin compensación por caída óhmica (Rp) del acero inmerso en suspensión del sólido Ca-menta en NaCl 0,1 M y en solución de NaCl 0,1 M

Acero inmerso en	2 h	5 h	24 h
	Rp ($\Omega.cm^2$)	Rp ($\Omega.cm^2$)	Rp ($\Omega.cm^2$)
Suspensión Ca-menta y NaCl 0,1 M	6073	6441	3761
Blanco (NaCl 0,1M)	171	203	261

Las curvas de polarización en modo Tafel confirmaron el corrimiento del potencial de corrosión hacia valores más positivos y una disminución en las velocidades de corrosión (luego de 5 y 24 h de inmersión), ya que se desplazan hacia corrientes menores cuando el acero está en contacto con el compuesto Ca-menta. Además, se observan modificaciones en la forma de las curvas tanto en la rama anódica como en la catódica, indicando modificaciones en las reacciones que están ocurriendo sobre el metal (Figura 3).

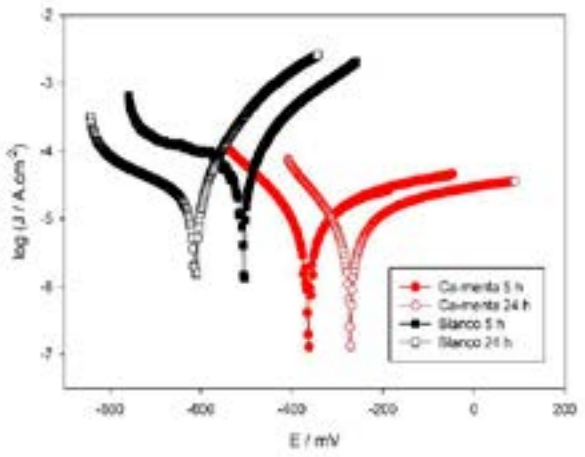


Figura 3. Curvas de polarización, modo Tafel, luego de 5 y 24 h de inmersión del acero SAE 1010 en la suspensión de Ca-menta en NaCl 0,1 M (rojo) y en NaCl 0,1M (negro).

Conclusiones

Es posible precipitar compuestos del extracto acuoso de menta con iones Ca(II) y obtener un inhibidor de la corrosión poco soluble en agua. Este inhibidor modifica el potencial del acero hacia valores más positivos con respecto a un blanco, aumenta en al menos un orden de magnitud la resistencia a la polarización de las reacciones de corrosión y modifica el mecanismo por el cual ocurren estas reacciones.

A partir de estos resultados se prevé formular, preparar y ensayar pinturas anticorrosivas con el compuesto Ca-menta como pigmento activo contra la corrosión.

Referencias

1. J. J. Caprari, Pinturas, 1et ed., Red CYTED VIII.D, 2003.
2. Y. E. Bhoge, V. J. Patil, T. D. Deshpande, R. D. Kulkarni, Synthesis and anticorrosive performance evaluation of zinc vanadate pigment, Vacuum 145 (2017) 290-294.
3. S. Roselli, C. Deya, M. Revuelta, A. R. Di Sarli, R.Romagnoli, Zeolites as reservoirs for Ce(III) as passivating ions in anticorrosion paints, Corr. Rev., 36 (2018) (3), 305–322.

4. O. D'Alessandro, C. Byrne, G. Selmi, C. Deyá, Anticorrosive paint with a modified zeolite as functional pigment for SAE 1010 steel protection, Pigment & Resin Technology, https://doi.org/10.1108/PRT-05-2020-0052
5. O. D'Alessandro, G. Selmi, A. Di Sarli, R. Romagnoli, C. Deyá, Accelerated tests, a necessary complement of electrochemical assays to evaluate anti- corrosive coatings, J. Appl. Electrochem., 49 (2019) (8), 1-12.
6. A. V. Zmozinski, R.S. Peres, K. Freiberger, C.A. Ferreira, S.M.M. Tamborim, D.S. Azambuja, Zinc tannate and magnesium tannate as anticorrosion pigments in epoxy paint formulations, Prog. Org. Coat. 121 (2018) 23–29.
7. A. Hadzich, S. Flores, J. Caprari, R. Romagnoli, Study of zinc tannates prepared with Tara powder (*Caesalpinia spinosa*) as anticorrosive pigments in alkyd paints and wash primer formulations, Prog. Org. Coat. (2018) 35-46.
8. F. Galliano, D. Landolt, Evaluation of corrosion protection properties of additives for waterborne epoxy coatings on steel, Prog. Org. Coat. 44 (2002) 217–225.
9. M. Abdullah Dar, A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media, Industrial Lubrication and Tribology 63 (2011) 227-233. https//doi.org/10.1108/00368791111140431
10. B. E. A. Rani and B. B. J. Basu, Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview, International Journal of Corrosion (2012) 1-15. https//doi.org/10.1155/2012/380217
11. A. S. Fouda, A. M. Nofal, G. Y. El-Ewady and A. S. Abousalem, Eco-friendly impact of rosmarinus officinalis as corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid solutions, Der Pharma Chemica, 7 (2015) (5)183-197.
12. M. ur Rahman, S. Gul, M. Umair, A. Anwar, A. K. K. Achakzai, Anticorrosive activity of Rosemarinus officinalis L. leaves extract against mild steel in dilute hydrochloric acid, IJIRAE, 3 (2016) (3) 38-43.
13. L. M. Chellouli, D. Chebabe, A. Dermaj, H. Erramli, N. Bettach, N. Hajjaji, M.P. Casaletto, C. Cirrincione, A. Privitera, A. Srhiri, Corrosion inhibition of iron in acidic solution by a green formulation derived from *Nigella sativa*, Electrochimica Acta 204 (2016) 50–59.
14. A. K. Singh, S. Mohapatra, B. Pani, Corrosion inhibition effect of Aloe Vera gel: Gravimetric and electrochemical study, J. Ind. Eng. Chem., 33 (2016) 288-2897.
15. A. A. Ayoola, O. S. I. Fayomi, I. G. Akande, O. A. Ayeni, O. Agboola, O. R. Obanla, O. G. Abatan, C. J. Chukwuka, Inhibitive corrosion performance of the eco-friendly aloe vera in acidic media of mild and stainless steels, J. Bio-and Tribo-Corr., (2020) 6, 67.
16. G. Vasyliev, V. Vorobyova, T. Zhuk, Raphanus sativus L. extract as a scale and corrosion inhibitor for mild steel in tap water, J. Chemistry, (2020) 5089758.
17. K. Rubinson, J. Rubinson, Análisis instrumental, Prentice Hall, Madrid, 2001, pp. 445-482.

SUSTITUCIÓN DE PELÍCULAS DE CONVERSIÓN A BASE DE CROMO EN ACERO GALVANIZADO MEDIANTE EL USO DE TIERRAS RARAS Y SILANOS: EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE SU DESEMPEÑO ANTICORROSIVO

Bastón, Candela[1], Deya, Cecilia[1,2], Banera, Mauro[1,2]

[1]Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, UNLP
[2]CIDEPINT (Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CONICET-CICPBA-UNLP). Av. 52 entre 121 y 122, sin número, (B1900AYUB) La Plata
Correo electrónico: m.banera@cidepint.ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Las películas de conversión a base de cromo hexavalente han sido ampliamente utilizadas en la industria para la protección del acero galvanizado tipo hot dip, debido a su excelente resistencia a la corrosión y su capacidad de autorreparación. Sin embargo, la alta toxicidad y el impacto ambiental negativo del cromo hexavalente han impulsado la búsqueda de alternativas más seguras y sostenibles. En este contexto, los compuestos de tierras raras, en particular el nitrato de cerio, han emergido como una opción prometedora para el desarrollo de nuevas películas de conversión con propiedades anticorrosivas comparables a las tradicionales[1].
El cerio, un elemento de la familia de las tierras raras, posee la capacidad de formar óxidos y sales que han demostrado inhibir eficazmente los procesos de corrosión en metales ferrosos y no ferrosos. Su potencial para sustituir los tratamientos a base de cromo se basa en su habilidad para formar recubrimientos pasivantes estables y su bajo impacto ambiental. Diversos estudios han evaluado la eficacia del cerio en diferentes aleaciones y condiciones de exposición, obteniendo resultados alentadores en términos de protección y durabilidad.
El presente trabajo se centra en el estudio de una alternativa basada en la combinación $Ce(NO_3)_3$ y [3-(2,3-epoxipropoxi)-propil]-trietoxisilano, explorando su efectividad como recubrimientos de conversión libres de cromo para el acero galvanizado tipo hot dip.
Se llevó a cabo una caracterización detallada de las películas obtenidas mediante técnicas electroquímicas, incluyendo curvas de polarización, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y voltamperometría cíclica (CV). Se estudian sus propiedades fisicoquímicas, su desempeño frente a ensayos de corrosión acelerada y su adhesión a recubrimientos orgánicos. A través de técnicas electroquímicas y de caracterización superficial, se comparan los resultados obtenidos con los de los tratamientos tradicionales a base de cromo hexavalente.

2. Parte experimental

2.1 Preparación del sustrato metalico

Como sustrato base se utilizó acero galvanizado comercial del tipo “hot-dip”, con dimensiones de 50 × 20 × 0,65 mm. Las muestras fueron sometidas a un proceso de limpieza electroquímica a temperatura ambiente, con el objetivo de eliminar posibles contaminantes superficiales, particularmente compuestos de Cr(VI). Dicho tratamiento se llevó a cabo en una solución de hidróxido de sodio al 10% p/v, empleando un ánodo de acero al carbono y aplicando una densidad de corriente constante de 0,2 A/cm² durante 60 segundos. Finalizada la limpieza, las probetas fueron enjuagadas cuidadosamente con agua de ósmosis inversa y posteriormente secadas mediante aire caliente.

2.2 Obtención de las recubrimientos de conversión

Las películas de conversión fueron obtenidas mediante la reducción potenciostática de las probetas El tratamiento se llevó a cabo aplicando un potencial de -0,1 V respecto al potencial de circuito abierto (OCP) en una solución acuosa de $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ a una concentración de 5 g/L, durante 5 minutos a temperatura ambiente (aproximadamente 22 °C).

Posteriormente, se realizó un postratamiento por inmersión de las probetas en una solución al 20% v/v de [3-(2,3-epoxipropoxi)-propil]-trietoxisilano, previamente hidrolizada durante una hora. La inmersión se efectuó durante 60 segundos a temperatura ambiente. Finalmente, las muestras tratadas fueron curadas en estufa a 100 °C durante una hora para favorecer la reticulación del recubrimiento silánico.

2.3 Medidas electroquimicas

El comportamiento frente a la corrosión de las distintas muestras preparadas fue evaluado mediante técnicas electroquímicas: curvas de polarización potenciodinámica, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y voltamperometría cíclica.
Todas las mediciones se realizaron empleando un potenciostato Gamry Reference 3000, configurado en una celda convencional de tres electrodos. La celda estuvo compuesta por una placa de acero inoxidable como contraelectrodo, un electrodo de $Ag/AgCl_{(sat)}$ como electrodo de referencia y las muestras bajo estudio como electrodo de trabajo. El área expuesta del electrodo de trabajo fue de 1,32 cm^2 para las mediciones de polarización y EIS, y de 4 cm^2 para los ensayos de voltamperometría cíclica.
Las curvas de polarización potenciodinámica (CP) se registraron controlando el equipo mediante el software Gamry Framework®, aplicando una velocidad de barrido de 0,1667 mV/s en un rango de potencial de ±100 mV respecto al potencial de circuito abierto (OCP).
Los ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica se realizaron, con un rango de frecuencia de 50 kHz a 10 mHz, aplicando una perturbación sinusoidal de ±10 mV sobre el OCP. Los espectros fueron ajustados y analizados empleando el software Gamry Echem Analyst®, utilizando circuitos equivalentes adecuados para la representación del sistema.
Las mediciones de polarización y EIS se efectuaron luego de dos horas de inmersión en una solución naturalmente aireada de NaCl 0,05 M.
Por su parte, las pruebas de voltamperometría cíclica fueron realizadas en el mismo equipo Gamry, a una velocidad de barrido de 100 mV/s, dentro de un rango de potencial de -1,5 V a +1,5 V vs ECS, en una solución aireada de borato compuesta por H_3BO_3 (35 g/L) y $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$ (40 g/L).
Todas las mediciones fueron efectuadas al menos por triplicado y a temperatura ambiente, asegurando la reproducibilidad de los resultados.

2.4 Analisis superficial

El análisis superficial de las probetas tratadas se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (SEM/EDS), con el objetivo de caracterizar la morfología y la composición química de las películas obtenidas.

3. Resultados y Discusión

3.1 Medidas electroquímicas

El análisis de los datos obtenidos a partir de las mediciones electroquímicas se centró en la evaluación comparativa de la protección anticorrosiva conferida por los recubrimientos aplicados. Los datos obtenidos de las curvas de polarización potenciodinámica fueron analizados para determinar parámetros clave del comportamiento corrosivo, tales como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la corriente de corrosión (i_{corr}).
Del análisis de las CP se puede inferir que todos los recubrimientos obtenidos disminuyen la corriente de corrosión en comparación con el sustrato sin tratar (HDG). De esto se desprende que los recubrimientos HDG+Ce, HDG+Si y HDG Ce+Si, presentan comportamientos similares, indicando que efectos anticorrosivos del mismo orden. Además, las disminución las densidades de corriente anódica y catódica sugiere la formación de una barrera protectora que limita la disolución del recubrimiento galvanizado. En particular, la película de Ce + silano exhibe un desplazamiento hacia valores más positivos del potencial de corrosión (Ecorr), indicando una menor tendencia a la disolución anódica del zinc [2]. En comparación con los recubrimientos

convencionales a base de cromo hexavalente, la performance de la película de conversión con cerio y silano se acerca a la de los tratamientos basados en cromo, aunque con una menor toxicidad ambiental. En la **Tabla 1** se presentan los valores de corriente de corrosión para los distintos recubrimientos logrados. Estos valores se obtuvieron a partir de la extensión de la corriente limite de la reacción cátodica hasta el potencial de corrosión, dado que la reacción cátodica controla la velocidad del proceso de corrosión.
Con en el fin de realizar una comparación entre los distintos recubrimientos ensayados, se calcula una eficiencia de protección, expresada a traves de la **Ec. 1**

$$EP\,\% = \frac{I_{corr,HDG} - I_{corr,HDG_R}}{I_{corr,HDG}} \qquad \textbf{Ec.1}$$

donde $I_{corr,HDG,R}$ y $I_{corr,HDG}$ son las corrientes de corrosión de las muestras de HDG con y sin recubrimiento de conversión, respectivamente.

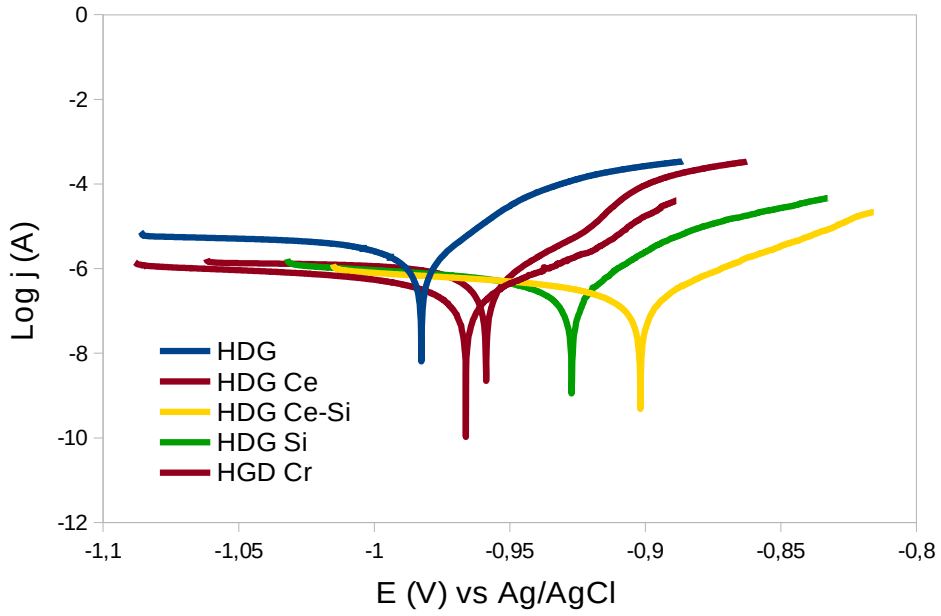


Figura 1. Curva de Polarización de las diferentes películas de conversión de HDG obtenidas en NaCl 0,05 M a 2 h de inmersión.

Muestra	Icorr (A)	Ecorr (V)	EP %
HDG	4,71E-06	-0,982	
HDG-Cr	1,25E-06	-0,958	73,4
HDG+Ce	7,69E-07	0,966	83,7
HDG-Si	7,26E-07	0,927	84,6
HDG-Ce-Si	5,54E-07	0,902	88,2

Tabla 1. Valores de potencial y corriente de corrosión obtenidos a partir de las curvas de polarización

De los resultados presentados en la **Tabla 1** se puede concluir que todos los recubrimientos libre de Cr, presentan una protección anticorrosiva superior a los recubrimientos de conversión clásico y de los tres sistemas propuestos, el sistema Ce-Si presenta una performance leventemente superior al resto.
En la **Figura 2** se presenta los espectros de impedancia electroquimica para el HDG en presencia y en ausencia de las películas de conversión. Para todos los ensayos de EIS realizados se observan dos constantes de tiempo, donde la constante de tiempo en la región de las bajas frecuencias, asociada a la película de conversión propiamente dicha, y en la región de las medias y bajas frecuencias vinculada al fenómeno de transferencia de carga.

Los espectros de impedancia electroquímica fueron interpretados mediante el ajuste a un circuito equivalente representativo de un sistema metálico recubierto. El modelo utilizado consistió en una resistencia del electrolito (R_s) en serie con dos elementos en paralelo: un elemento de fase constante (CPE_coat) y una resistencia asociada al recubrimiento (R_coat), seguido por otro CPE (CPE_dl) y una resistencia de polarización (Rp) correspondientes a la doble capa y al proceso de transferencia de carga, respectivamente.
Este circuito refleja adecuadamente la respuesta de un recubrimiento con propiedades barrera, distinguiendo entre la contribución resistiva y capacitiva del recubrimiento y la interfase electrodo/solución.
El ajuste de los espectros fue realizado utilizando el software Gamry Echem Analyst®, asegurando un error de ajuste inferior al 5%. Los parámetros obtenidos incluyen:

- R_s (Ω): resistencia del electrolito.
- Rcoat (Ω): resistencia del recubrimiento, relacionada con la integridad y eficacia barrera.
- CPE_coat (Y_0, n): comportamiento capacitivo no ideal del recubrimiento, asociado a heterogeneidades estructurales.
- Rp (Ω): resistencia de polarización, indicativa de la dificultad para la transferencia de carga.
- CPE_dl (Y_0, n): comportamiento de la doble capa en la interfase metal/solución.

En la **Tabla 2** se presentan los valores obtenidos del ajuste de los datos de EIS mediante el circuito equivalente propuesto.

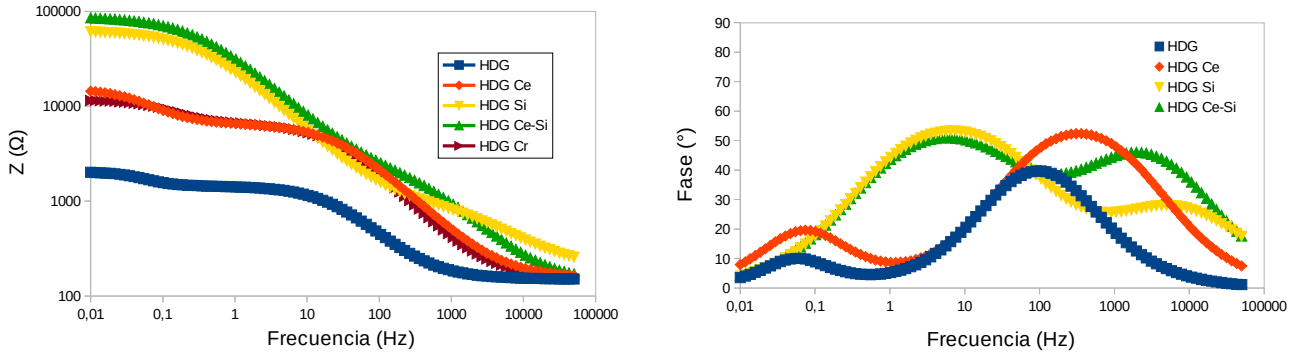


Figura 2. Diagrama de Bode de HDG con y sin películas de conversión de HDG obtenidas en NaCl 0,05 M.

El análisis de los datos de EIS revela que el sistema Ce + silano presenta una impedancia total significativamente mayor en comparación con el acero galvanizado sin recubrimiento. Asimismo, el ajuste de los datos a un circuito equivalente indica la presencia de una capa de barrera estable, lo que se correlaciona con la reducción de la corriente de corrosión observada en las curvas de polarización. Este comportamiento confirma la sinergia entre el cerio y el silano en la formación de una barrera eficaz contra la corrosión en medios salinos.
Con el objetivo de evaluar la fracción de superficie cubierta por las películas de conversión generadas [3], se llevaron a cabo mediciones de voltamperometría cíclica. En la **Figura 4** se muestran las curvas voltamperométricas correspondientes a las muestras analizadas, tanto en ausencia como en presencia de recubrimiento de conversión.

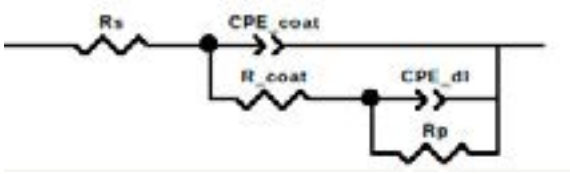


Figura 3. Circuito equivalente empleado para los ajuste de los datos de EIS

Muestra	Rs(Ω)	CPE1(S*s^n)	n1	R1(Ω)	CPE2(S*s^a)	n2	R2(Ω)
HDG	191,3	1,62E-05	0,78	1,31E+03	5,79E-03	0,92	5,80E+02
HDG-Ce	176,2	2,75E-05	0,66	2,68E+03	3,81E-03	0,89	8,58E+03
HDG-Si	174,8	2,37E-06	0,66	9,78E+02	7,26E-06	0,74	6,20E+04
HDG-Ce-Si	140,2	1,32E-06	0,71	1,18E+03	5,88E-06	0,66	8,26E+04
HDG-Cr	154,5	3,12E-06	0,78	6,57E+03	2,73E-04	0,88	4,94E+03

Tabla 2. Parámetros obtenidos de los ajuste de los datos de EIS

Se observa que la mayoría de las muestras presentan un único pico anódico, asociado a la formación de una película pasiva constituida por ZnO y/o $Zn(OH)_2$, seguido por una región característica de pasivación, excepto la correspondiente a HDG-Ce-Si que evidencia un cobertura superficial total. La **Tabla 3** resume los valores de corriente pico (Ip) y la carga integrada (Q) correspondiente a la respuesta anódica para cada una de las muestras ensayadas.

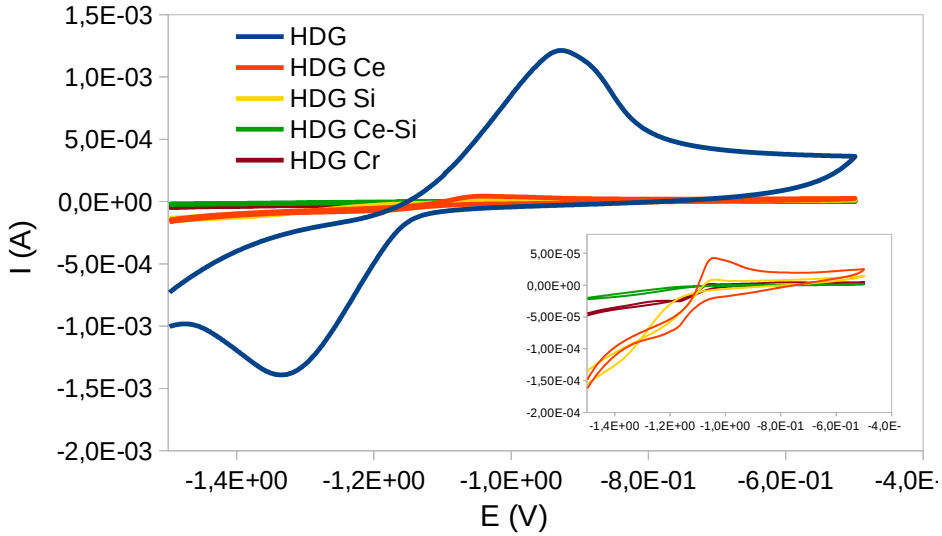


Figura 4. Voltagramas cíclicos obtenidos para las muestras de HDG con y sin recubrimientos de conversión

Las películas formadas actúan como barrera física, limitando la accesibilidad del electrolito al sustrato metálico, lo que se traduce en una disminución de la densidad de corriente pico y una menor transferencia de carga. Sin embargo, la presencia de una respuesta anódica residual en las muestras recubiertas indica que el recubrimiento no logra un cubrimiento total de la superficie.
Para cuantificar la eficacia del recubrimiento en términos de cobertura superficial, se calculó un factor de cubrimiento relativo (FCR), a partir de la comparación de las cargas anódicas integradas del sustrato sin recubrimiento (Q_0) y del recubierto (Q_i). Este parámetro se define mediante la siguiente expresión:

$$FCR = 1 - \frac{Q_i}{Q_0} \qquad \textbf{Ec.2}$$

donde:

- Q_0 es la carga anódica (en $C \cdot cm^{-2}$) registrada para la muestra sin recubrimiento.
- Q_i es la carga anódica (en $C \cdot cm^{-2}$) correspondiente a la muestra recubierta.

Muestra	Ip (A)	Q (C/cm²)	FCR
HDG	1,21E-03	2,68E-03	—
HDG Ce	4,28E-05	6,43E-05	0,9760
HDG Si	8,88E-06	4,25E-07	0,9998
Hdg Cr	5,10E-05	7,37E-05	0,9725
HDG Ce-Si	---	---	1,0000

Tabla 4. Parámetros obtenidos de los ensayos de voltamperometria ciclica

Un valor de FCR cercano a 1 (**Tabla 4**) indica un alto grado de cobertura superficial, mientras que valores significativamente menores indicarían la existencia de áreas expuestas del sustrato susceptibles a procesos corrosivos. Es importante destacar que las cargas fueron normalizadas respecto a la superficie geométrica expuesta de las muestras, para permitir una comparación directa y precisa entre las distintas condiciones ensayadas.

3.2 Análisis superficial

Las imágenes SEM revelaron la presencia de una película de conversión de morfología irregular sobre la superficie del acero galvanizado. Esta película fue lo suficientemente delgada como para permitir la identificación de defectos en el sustrato base, lo que sugiere una cobertura no uniforme. Se observaron pequeños aglomerados más brillantes dispersos sobre la superficie, los cuales están asociados a la acumulación de óxidos de cerio (CeO_2). Estos aglomerados indican una posible heterogeneidad en la distribución del cerio sobre la superficie. El análisis EDS confirmó la presencia de cerio (Ce) en la superficie metálica, lo que corrobora la formación de una película de conversión basada en este elemento [4]. La detección de Ce sugiere que el tratamiento con cerio fue efectivo en la formación de una capa protectora, aunque la morfología irregular podría indicar áreas con menor protección contra la corrosión
Las imágenes de Acero Galvanizado con Película de Cerio y Silano se observó una superficie con agregados de cerio similares a los encontrados en la muestra HDG-Ce. Sin embargo, la presencia de silano introdujo una película adicional de aspecto opalescente, característica de los recubrimientos de silano. Esta película mostró una mayor uniformidad en comparación con la muestra tratada únicamente con cerio, lo que sugiere que el silano actúa como un agente de homogeneización y mejora la integridad del recubrimiento. El análisis EDS confirmó la presencia simultánea de cerio (Ce) y silicio (Si) en la superficie, lo que indica la formación de una película híbrida compuesta por ambos elementos [5]. La detección de silicio está asociada a la formación de una red de silano, la cual puede mejorar la adherencia y resistencia del recubrimiento. Además, la presencia de Ce sugiere que el cerio sigue desempeñando un papel activo en la protección contra la corrosión, posiblemente mediante la formación de óxidos estables

4 Conclusiones

- Los recubrimientos de conversión basados en cerio y silano demostraron una notable capacidad para reducir la corriente de corrosión en comparación con el sustrato sin tratar. En particular, la combinación de cerio y silano (HDG-Ce-Si) mostró un desempeño superior, con un desplazamiento hacia valores más positivos del potencial de corrosión (Ecorr), lo que indica una menor tendencia a la disolución anódica del zinc. Esto sugiere que la sinergia entre el cerio y el silano contribuye a la formación de una barrera protectora eficaz contra la corrosión.
- El análisis superfical reveló la presencia de una película de conversión de morfología irregular en las muestras tratadas con cerio (HDG-Ce), con aglomerados de óxidos de cerio distribuidos heterogéneamente. En el caso de las muestras tratadas con cerio y silano (HDG-Ce-Si), se observó una mayor uniformidad en la superficie, atribuida a la formación de una red de silano que mejora la integridad del recubrimiento. La detección de silicio (Si) y cerio (Ce) confirmó la formación de una película híbrida que combina las propiedades protectoras de ambos compuestos.
- Los resultados de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y voltamperometría cíclica (CV) indicaron que las películas de conversión actúan como una barrera física que limita el acceso del electrolito al sustrato metálico. Además, la presencia de cerio promueve la formación de óxidos estables que inhiben los procesos de corrosión, mientras que el silano mejora la adherencia y homogeneidad del recubrimiento.
- Aunque los recubrimientos basados en cerio y silano no alcanzan completamente el desempeño de los tratamientos tradicionales a base de cromo hexavalente, su eficacia anticorrosiva es comparable y presenta ventajas significativas en términos de sostenibilidad y bajo impacto ambiental. Esto posiciona a estas películas como una alternativa viable para aplicaciones industriales que requieren protección contra la corrosión.

5. Referencias

1- Montemor, M. F. (2014). Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. Surface and Coatings Technology, 258, 17-37
2- Zheludkevich, M. L., Tedim, J., & Ferreira, M. G. S. (2015). Smart coatings for corrosion protection of metallic materials. In Intelligent Coatings for Corrosion Control (pp. 3-28). Butterworth-Heinemann.
3- P.R. Seré, W. Egli, and A.R. Di Sarli, “Preparation and Characterization of Silanes Films to Protect Electrogalvanized Steel”. J. of Mater. Eng. and Perform., vol. 27, pp. 1194–1202, 2018.
4- Fayyad, E. M., Abdullah, A. M., Hassan, M. K., Mohamed, A. M., & Jarjoura, G. (2016). Recent advances in the use of rare earth metals for corrosion protection of steel and aluminum alloys. Journal of Materials Science & Technology, 32(12), 1307-1316.
5- Figueira, R. B., Silva, C. J. R., & Pereira, E. V. (2015). Organic–inorganic hybrid sol–gel coatings for metal corrosion protection: A review of recent progress. Journal of Coatings Technology and Research, 12(1), 1-35.

OPTIMIZACIÓN DE LA ELECTRORECUPERACIÓN DE METALES DESDE RESIDUOS ELECTRÓNICOS: INFLUENCIA DEL VOLTAJE Y CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS

Buono, Camila[1], Massa, Angela[1] , Damelio Campitelli, Serena[1], Dasilva, Agostina[1], Sanchez, Manuel[1], Anacleto, Clara[1], Deya, Cecilia[1,2], Banera Mauro[1,2]

[1]Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, UNLP
[2]CIDEPINT (Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CONICET-CICPBA-UNLP). Av. 52 entre 121 y 122, sin número, (B1900AYUB) La Plata
Correo electrónico: m.banera@cidepint.ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

El vertiginoso avance de la industria electrónica, junto con la rápida obsolescencia programada de dispositivos, ha generado un crecimiento exponencial en la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), también conocidos como residuos electrónicos o e-waste. Según reportes recientes, a nivel mundial se generan anualmente más de 50 millones de toneladas de RAEE, proyectándose un incremento sostenido debido al aumento en la demanda de dispositivos tecnológicos y la reducción del ciclo de vida útil de estos productos [1].

Los residuos electrónicos presentan un desafío ambiental significativo, ya que pueden contener componentes tóxicos (plomo, mercurio, cadmio) que, de no ser gestionados adecuadamente, pueden contaminar suelos y aguas subterráneas. Sin embargo, simultáneamente, representan una fuente secundaria altamente rica de metales valiosos como cobre (Cu), oro (Au), plata (Ag), níquel (Ni), zinc (Zn) y estaño (Sn), entre otros. Por ejemplo, se estima que la concentración de oro en una tonelada de placas base de computadoras puede ser hasta 50 veces mayor que la de los minerales auríferos tradicionales [2].

Tradicionalmente, el reciclaje de RAEE se ha llevado a cabo mediante procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. Aunque eficientes, estos procesos presentan limitaciones significativas: elevados requerimientos energéticos, emisiones contaminantes y generación de residuos secundarios difíciles de manejar [3]. Frente a este panorama, las tecnologías electroquímicas han emergido como una alternativa viable, limpia y de bajo costo para la recuperación selectiva de metales, destacándose por su flexibilidad operativa, posibilidad de operar a baja temperatura y capacidad para tratar soluciones complejas.

Particularmente, la electrodeposición ha demostrado ser una técnica eficiente para la recuperación de metales desde soluciones ácidas resultantes de la lixiviación de RAEE. Esta técnica permite la reducción controlada de iones metálicos sobre un cátodo mediante la aplicación de una diferencia de potencial, ajustando parámetros como el voltaje, tiempo de operación, tipo de electrodos y composición del electrolito para optimizar la selectividad y eficiencia de la recuperación [4].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la recuperación electroquímica de metales valiosos contenidos en placas base de computadoras desechadas. Para ello, se empleó un pretratamiento con agua regia para disolver los metales presentes en el residuo, seguido de la electrodeposición en un reactor a escala laboratorio, variando el ΔV aplicado. Posteriormente, se caracterizó la composición metálica de los depósitos mediante espectroscopía de absorción atómica, permitiendo analizar la eficiencia y selectividad del proceso bajo diferentes condiciones operativas.

Este estudio busca contribuir al desarrollo de estrategias sustentables para el aprovechamiento de RAEE, alineándose con los principios de la economía circular y la minimización de impactos ambientales, además de aportar información relevante para la optimización de procesos electroquímicos aplicables a nivel industrial.

2. Parte Experimental

2.1 Materiales y reactivos

Como residuo electrónico se empleó una placa base de computadora, la cual se sometió a digestión química con 600 mL de agua regia durante 1 hora para disolver los metales presentes. Para la preparación del agua regia se mezclaron, bajo campana de laboratorio, HCl concentrado y HNO_3 concentrado, en una relación 3:1.
En la electro-disolución de los metales recuperados se empleando ácido sulfúrico 0.5 M, como electrolito, el cual fue preparado a partir de reactivos analítico.
Como materiales de electrodo se utilizó una malla de acero inoxidable (3×3 cm) como cátodo y una barra de grafito como ánodo.

2.2 Preparación de la solución metálica

Las placas base fueron fraccionadas manualmente en trozos menores a 2 cm^2 para maximizar la superficie de reacción. Se trataron con 600 mL de agua regia en un reactor de vidrio, bajo agitación constante, durante 1 hora a temperatura ambiente. Finalizada la digestión, la solución fue filtrada para remover residuos sólidos, obteniendo un licor oscuro, rico en metales disueltos.

2.3 Proceso electroquímico

Se utilizó un reactor electroquímico *ah doc* de 50 mL. El cátodo fue una malla de acero inoxidable (área efectiva: 9 cm^2) previamente pesada. El ánodo fue una barra de grafito. Se realizaron ensayos a cuatro tensiones distintas: 1,5 V, 2,0 V, 2,5 V y 3,0 V, cada uno durante 10 minutos. La corriente fue suministrada por una fuente DC. Tras cada ensayo, el cátodo fue enjuagado con agua destilada, secado con aire caliente y pesado para determinar la masa de metal depositado.

2.4 Voltamperometria Ciclica

Se realizó un estudio voltamperométrico de la solución de lixiviación empleando una celda electroquímica de tres electrodos. El electrodo de trabajo fue un alambre de platino (Pt) de alta pureza, previamente pulido con papel de lija de grano fino (hasta 1200 grit) y limpiado con agua desionizada y acetona. Como contraelectrodo se utilizó una lámina de acero inoxidable de 1 cm^2 de área. El electrodo de referencia fue un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) en solución de KCl saturado. La velocidad de barrido de 100 mV/s y el rango de potencial estudiado fue -0,8 a 1,0 V.

2.5 Análisis de los depósitos

Los depósitos metálicos sobre el cátodo fueron disueltos electroquímicamente en ácido sulfúrico 0.5 M. Posteriormente, la solución obtenida fue analizada mediante espectroscopia de absorción atómica (Shimadzu Atomic Absortion Spectophotometer AA-7000) para cuantificar la concentración de Zn, Cu, Au, Sn, Ni, Ag y Pb presentes en los depósitos.

3. Resultados y Discusión

3.1 Masa de metal recuperado

Las masas obtenidas luego de cada electrorecuperación es una primera tendencia del comportamiento del sistema para las diferentes tensión de operación ensayadas. En la **Tabla 1** se los valores obtenidos, donde se observa que a 2,0 V se obtuvo la mayor masa depositada. A mayores tensiones (2,5 V y 3,0 V), la eficiencia disminuyó, posiblemente debido al incremento en la evolución de hidrógeno, la disolución secundaria de algunos metales menos nobles y/o el desprendimiento de la masa depositada por la producción de gases sobre el cátodo.

Tensión (V)	Masa Recuperada (mg)
1,5	30,5
2,0	77,9
2,5	55,6
3,0	8,8

Tabla 1. Masa recuperada para las distintas tensiones evaluadas

3.2 Análisis Voltamperometrico

El voltamperograma registrado para la solución de agua regia diluida (1:100) con los metales disueltos se presenta en la Figura 1. El perfil voltamétrico muestra varias características notables, tanto en la rama catódica como en la anódica, que permiten identificar los procesos electroquímicos relacionados con la recuperación de los metales presentes en la solución:

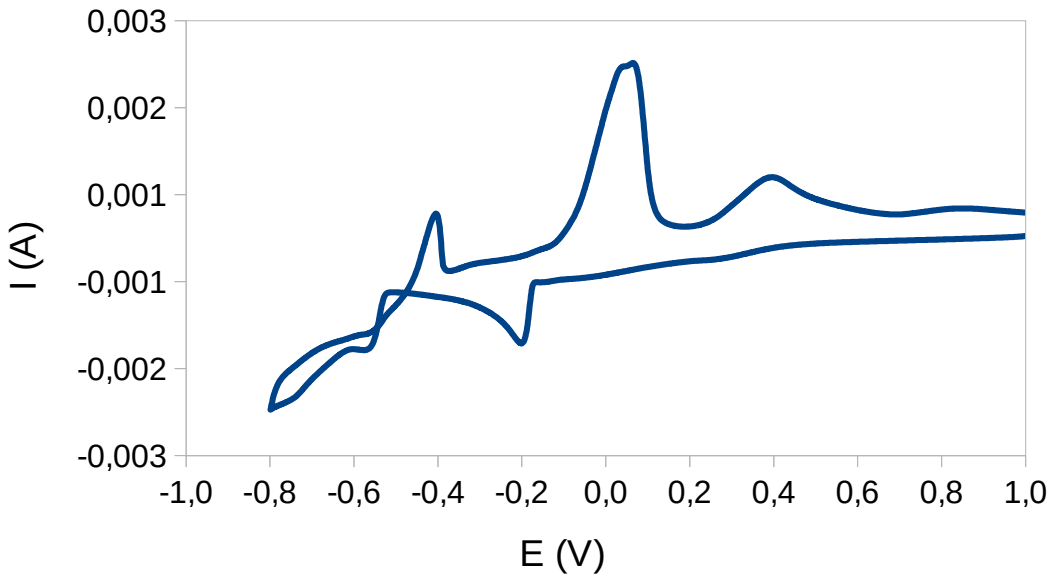


Figura 1. Voltamperograma de la solución de agua regia con metales disueltos, velocidad de barrido 100 mV/s.

- Pico catódico en torno a -0.6 V a -0.4 V: Se observa una corriente negativa significativa en este rango de potencial, atribuible principalmente a la reducción de $Cu^{2+} \rightarrow Cu^{0}$ y $Ag^{+} \rightarrow Ag^{0}$. Estos metales, debido a sus potenciales de reducción relativamente positivos, son depositados fácilmente sobre el electrodo de platino.
- Pico catódico más negativo (entre -0.7 V y -1.0 V): En esta región se destaca la reducción de metales menos nobles como $Ni^{2+} \rightarrow Ni^{0}$ y $Zn^{2+} \rightarrow Zn^{0}$. La presencia de níquel en alta concentración en la solución, confirmada por la absorción atómica, es coherente con la intensidad de corriente observada. Además, dada la acidez del medio (producto del tratamiento con agua regia), es posible que se inicie la evolución de hidrógeno (HER) a potenciales más negativos.
- Pico anódico alrededor de 0 V y +0.3 V: Durante la rama anódica, se identifican procesos de oxidación del cobre y plata depositados. El pico más marcado cercano a 0 V corresponde a la reoxidación de $Cu^{0} \rightarrow Cu^{2+}$, mientras que el pico a +0.3 V puede estar asociado a $Ag^{0} \rightarrow Ag^{+}$ y posiblemente Sn.
- Región anódica positiva (hasta +0.5 V): Se aprecia una leve corriente anódica continua, que podría relacionarse con la formación de óxidos metálicos o procesos secundarios en la superficie del electrodo de platino.

La información obtenida concuerda con los resultados de absorción atómica, donde la recuperación efectiva de cobre, níquel y plata a potenciales moderados fue evidente.

3.2 Composición metálica de los depósitos

Los depósitos obtenidos sobre el cátodo a cada potencial fueron analizados por espectroscopía de absorción atómica, permitiendo cuantificar la concentración de Zn, Cu, Ag, Ni, Sn y Pb. En la **Figura 2** se presentan los valores determinados para la solución de agua regia luego de la extracción ácida, donde se puede apreciar que el Cu y el Sn se encuentran en mayor proporción y los elementos Pb y Ag en menor proporción.

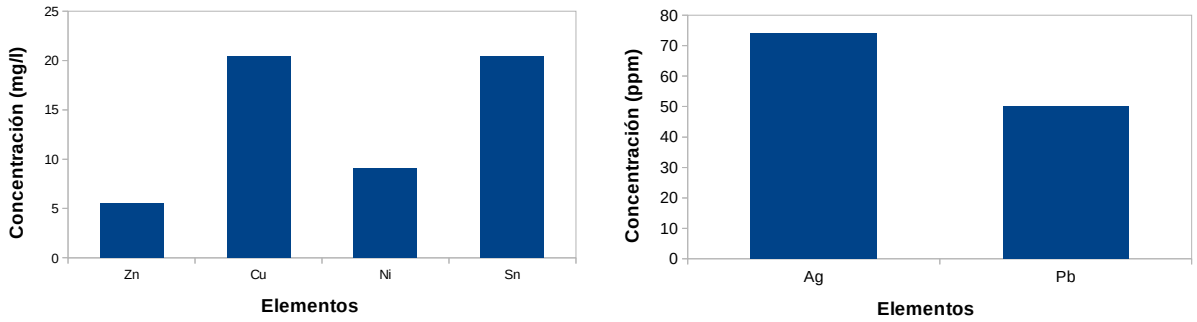


Figura 2. Concentraciones de Zn, Cu, Ni, Sn, Ag y Pb contenidos en la solución de lixiviado

En la **Figura 3** se presentan la distribución de los elemento analizado para cada valor de tensión ensayado. A continuación, se detallan las tendencias observadas para cada metal:

- Níquel (Ni): El níquel mostró las mayores concentraciones recuperadas a potenciales bajos y moderados, alcanzando su valor máximo a 2,5 V (66,6 ppm). Sin embargo, a 3,0 V, la recuperación disminuyó significativamente (3,9 ppm). Esto podría atribuirse a la disminución de la eficiencia catódica a voltajes altos, posiblemente por la aparición de reacciones secundarias (como la evolución de hidrógeno) que compiten con la reducción de Ni^{2+}.
- Cobre (Cu): Se observa un incremento notable en la recuperación de cobre a 2,5 V (118,2 ppm) y 3,0 V (82,6 ppm), siendo este comportamiento coherente con el potencial estándar de reducción del Cu^{2+}/Cu (0,34 V vs ENH). A potenciales más bajos, la deposición es limitada, pero a partir de 2,0 V el proceso se vuelve más eficiente, alcanzando su máximo a 2,5 V. El descenso a 3,0 V puede deberse al desprendimiento de depósitos por burbujeo excesivo de hidrógeno.
- Níquel y cobre presentan así comportamientos complementarios: el níquel muestra mejor recuperación en el rango bajo a medio, mientras que el cobre se favorece a voltajes más altos.
- Estaño (Sn): Presentó una recuperación irregular, alcanzando un valor considerable a 3.0 V (3.2 ppm), aunque a voltajes intermedios como 2.5 V fue prácticamente nula. Esto podría deberse a la competencia con reacciones secundarias y la pasivación superficial del cátodo, afectando su eficiencia.
- Plomo (Pb): Las concentraciones de plomo se mantuvieron relativamente constantes en todos los potenciales (~0,067-0,070 ppm), indicando una limitada recuperación y poca dependencia del potencial aplicado bajo estas condiciones operativas.
- Oro (Au): No se detectaron concentraciones apreciables de oro en ninguno de los ensayos. Esto puede deberse a su baja concentración inicial en la solución ácida resultante del pretratamiento o a una inadecuada configuración para su reducción selectiva en el rango de potenciales empleados.

En términos globales, se observa que el potencial aplicado influye notablemente en la eficiencia de recuperación de los diferentes metales. Mientras que metales con potenciales estándar más positivos (como Ag y Cu) muestran mejores rendimientos a potenciales intermedios-altos, otros

como Zn y Sn requieren condiciones más específicas para optimizar su deposición. Asimismo, los resultados sugieren que existen interaccione competitivas entre los iones presentes, las cuales afectan la selectividad del proceso.

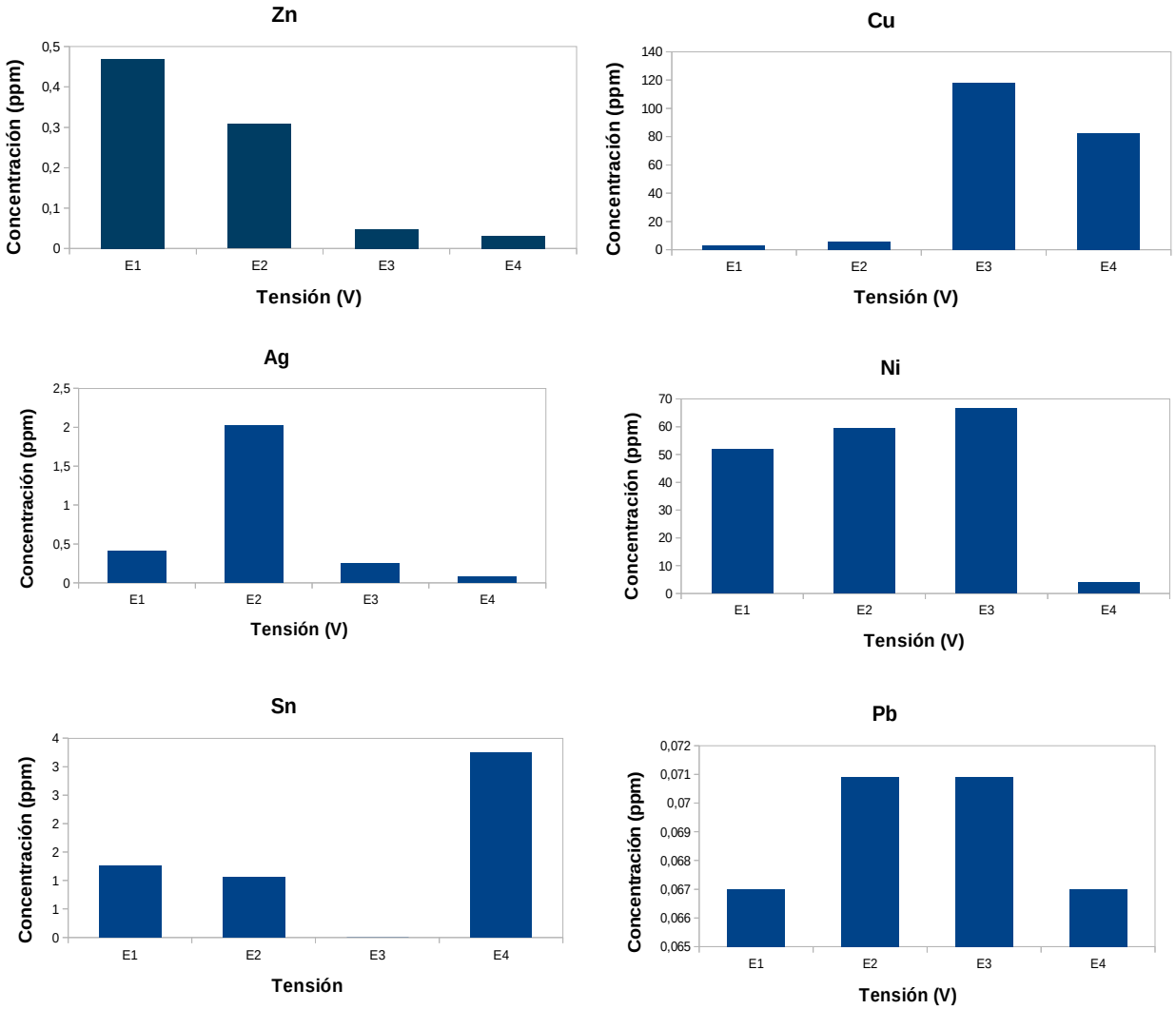


Figura 3. Cantidades obtenidas a partir de espectroscopia de absorción átomica para los distintos elementos depositados.

4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la viabilidad de recuperar metales valiosos a partir de placas base de computadora mediante un tratamiento combinado de lixiviación con agua regia y electrodeposición. Los principales hallazgos son:

- La máxima masa total recuperada se obtuvo a 2.0 V, destacando una eficiencia significativa en este rango de tensión.
- La espectroscopía de absorción atómica reveló que los metales predominantes recuperados fueron níquel y cobre, seguidos por menores cantidades de plata, zinc, estaño y plomo. No se detectó recuperación de oro.
- El análisis voltamperométrico permitió identificar claramente los procesos de reducción y oxidación de los metales presentes, confirmando los resultados experimentales y proporcionando información clave para la optimización del proceso.

El método desarrollado representa una alternativa prometedora para el reciclaje sostenible de residuos electrónicos, con potencial de escalado industrial.

5. Referencias

1- Forti, V., Baldé, C.P., Kuehr, R., Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020. United Nations University.
2- Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. Journal of Hazardous Materials, 158(2-3), 228-256.
3- Tuncuk, A., Stazic, B., Akcil, A. (2018). A review of the characteristics and reuse of secondary 4- raw materials from electronic waste. Minerals Engineering, 122, 195-208.
4- Işıldar, A., Rene, E.R., van Hullebusch, E.D., Lens, P.N.L. (2019). Electronic Waste Recycling via Hydrometallurgical and Electrochemical Processes: Opportunities and Challenges. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 49(10), 869-900.

OPERACIONES DE NEUTRALIZACIÓN Y CRISTALIZACIÓN PARA LA PURIFICACIÓN DE GLICEROL CRUDO

Buono, Camila M.; Perez; Federico M.; Pompeo Francisco; Gatti Martín N.; Santori Gerardo*

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP.
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA) - Laboratorio Calle 50 N º 184, 1900, La Plata, Argentina.
*e mail: gerardo.santori@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Durante la última década, el sector de los biocombustibles ha experimentado un rápido y notable crecimiento a nivel nacional, impulsado principalmente por la creciente demanda internacional desde mediados del 2000. Este aumento en la demanda se debe a nuevas legislaciones enfocadas en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, junto con la competitividad del complejo oleaginoso local, lo que favoreció importantes inversiones tanto nacionales como extranjeras para integrar un nuevo eslabón en la cadena productiva [1]. En Argentina, el biodiesel se produce exclusivamente a partir de aceite de soja mediante un proceso de transesterificación de aceites vegetales con alcoholes de bajo peso molecular, como metanol. Se estima que en el proceso se obtiene 1 kg de glicerol crudo por cada 10 kg de biodiesel, esto es aproximadamente un 10 % en peso. El glicerol es un polialcohol de tres carbonos con tres grupos hidroxilo con propiedades fisicoquímicas de interés en diferentes industrias [2]. Su estructura química lo convierte en una molécula plataforma para la obtención de diversos productos químicos a través de diferentes reacciones como reformado [3], esterificación [4] e hidrogenólisis [5], entre otras.

El principal problema para el uso del glicerol crudo tal cual es obtenido del proceso productivo del biodiesel es la cantidad significativa de impurezas que contiene. Entre las principales se destacan el metanol e hidróxido de sodio utilizados en el proceso de producción de biodiesel y materia orgánica no glicerina (MONG), que comprende jabones, triglicéridos, fosfolípidos y ésteres metílicos [6-8].

Con el objetivo de mejorar la calidad del glicerol crudo y proporcionar al mercado un glicerol purificado para su aplicación industrial, se lo somete a distintos pasos de purificación.

Estos pasos incluyen operaciones fisicoquímicas secuenciales como neutralización, separación de fases, cristalización, filtración, adsorción y tratamientos con solventes. También se pueden aplicar operaciones de refinación avanzadas como la destilación al vacío, el intercambio iónico, y la separación por membranas. Dependiendo de la escala de producción y la composición del glicerol, se aplica una combinación diferente de etapas de purificación.

En particular, la neutralización consiste en la aplicación de un ácido para eliminar los jabones y restos de la base empleada como catalizador. Suelen emplearse ácidos inorgánicos, como sulfúrico, fosfórico, clorhídrico y acético [9]. El contenido de agua en el glicerol crudo, la elección del ácido y el pH alcanzado influyen en la cantidad y composición de fases formadas durante el proceso, que suelen ser 2 o 3 [10].

La reacción entre el ácido y los jabones origina ácidos grasos libres (AGL), los cuales al ser insolubles se separan del glicerol, mientras que la reacción con la base forma agua y sales. En caso de no precipitar una vez neutralizada la muestra, las sales podrían ser cristalizadas mediante una modificación de la temperatura.

En este trabajo se estudiaron las operaciones de neutralización y cristalización de muestras de glicerol crudo alcalino con el objetivo de eliminar la base presente en ellas. Para llevar a cabo la neutralización se emplearon distintos ácidos y se determinó la relación volumétrica necesaria de ácido a glicerol. Finalmente se empleó la operación de cristalización con el objetivo de precipitar las sales formadas.

Metodología

Caracterización de muestras de glicerol crudo

Las muestras de glicerol crudo alcalinas fueron provistas por una empresa localizada en la provincia de Santa Fe, y fueron caracterizadas por su densidad, pH y concentraciones de glicerol, agua, metanol (MeOH), cenizas y materia orgánica no glicerina (MONG).
El pH fue determinado empleando 1 g de glicerol crudo disuelto en 50 ml de agua destilada utilizando un pH-metro digital (Ohaus ST20, Greifensee, Suiza) a temperatura ambiente. La densidad fue determinada empleando un picnómetro a temperatura ambiente (ASTM 891-95). Las concentraciones de glicerol y MeOH fueron determinadas empleando soluciones diluidas del glicerol crudo por cromatografía gaseosa utilizando un equipo Shimadzu GCMS-QP505A (Shimadzu Corporation, Tokyo, Japan) equipado con una columna capilar Elite PE-WAX (30mx0,25mmx0,5μm) y detector FID. El contenido de agua fue medido empleando un titulador de Karl-Fisher (SI Analytics TitroLine Alpha 20 Plus, Xylem Analytics,Weilheim, Germany) de acuerdo a la norma ISO 2098-1972. El contenido de cenizas fue determinado calcinando 1 g de glicerol crudo en mufla a 750 °C por 3 h (ISO 2098-1972). El contenido de materia orgánica no glicerol (MONG) fue calculado como indica la Ecuación 1.

$$\text{MONG (\%)} = 100 - \text{contenido glicerol (\%)} - \text{contenido cenizas (\%)} - \text{contenido de agua (\%)} \quad (1)$$

Neutralización de las muestras de glicerol crudo

Para llevar a cabo la neutralización se prepararon soluciones acuosas consistentes de 20 ml de glicerol crudo alcalino y 80 ml de agua destilada. Las soluciones fueron dispuestas en un matraz con agitación magnética a 300 rpm y tituladas empleando distintos ácidos: ácido sulfúrico (Cicarelli, 98 %p/p), ácido fosfórico (Cicarelli, 85 %p/p), ácido fórmico (Cicarelli, 85 %p/p) y ácido acético (Biopack, 99 %p/p). Los ensayos se llevaron a cabo utilizando un pH-metro digital a temperatura ambiente, previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4, 7 y 10. En cada caso se registró la variación de pH en función del volumen de ácido consumido. A partir de las curvas de titulación se determinaron el punto equivalente, el punto final y las relaciones volumétricas de ácido a glicerol necesarias. Para cada ácido las titulaciones fueron realizadas por triplicado.

Cristalización

Para precipitar las sales formadas se utilizó la operación de cristalización. En cada ensayo se utilizaron 20 ml de glicerol crudo previamente neutralizado, que fueron sometidos a un descenso térmico a 0 °C utilizando un criostato. Para el caso de la muestra neutralizada con ácido sulfúrico se implementó un aumento térmico hasta 80 °C. En ambos casos se ensayó una variación del tiempo de cristalización.
Al finalizar la operación, las muestras fueron centrifugadas y el líquido sobrenadante fue tratado a 750 °C durante 3 h en mufla para cuantificar la masa de sal no cristalizada. Luego, la masa de sal precipitada fue calculada como una diferencia entre la masa inicial de sal y la masa de sal en el sobrenadante. Finalmente, el grado de recuperación se calculó empleando la Ecuación 2.

$$\text{Grado de recuperación (\%)} = \left(\frac{\text{masa precipitada de sal}}{\text{masa inicial de sal}}\right) \text{x } 100\ \% \quad (2)$$

Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra los resultados de caracterización del glicerol crudo alcalino.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas y composición del glicerol crudo alcalino.

pH	Densidad (g mL^{-1})	Composición (%p/p)				
		Glicerol	H_2O	Cenizas	MeOH	MONG
13,80	1,1138	50,0	1,5	4,5[a]	13,0	31,0[b]

[a] NaOH [b] el contenido de MeOH (%p/p) se ha descontado del contenido total de MONG (%p/p)

El glicerol crudo resulta alcalino, presentando un pH de 13,8. La alcalinidad se debe a la presencia de NaOH bajo la forma de NaOH libre (2,5 %p/p) y NaOH formando parte de jabones (2 %p/p). Este NaOH forma parte de las cenizas, una vez calcinada a la muestra a 750 °C durante 3 h. Los MONG incluyen: jabones (15 %p/p) y materia grasa no saponificable (15 %p/p). El contenido de MeOH es elevado (13 %p/p) debido a que el glicerol crudo proviene de la síntesis de biodiesel sin proceso de destilación previo.
La Figura 1 muestra las curvas de titulación ácido-base para muestras de glicerol crudo alcalino neutralizadas con: ácido acético, ácido fórmico, ácido sulfúrico y ácido fosfórico.

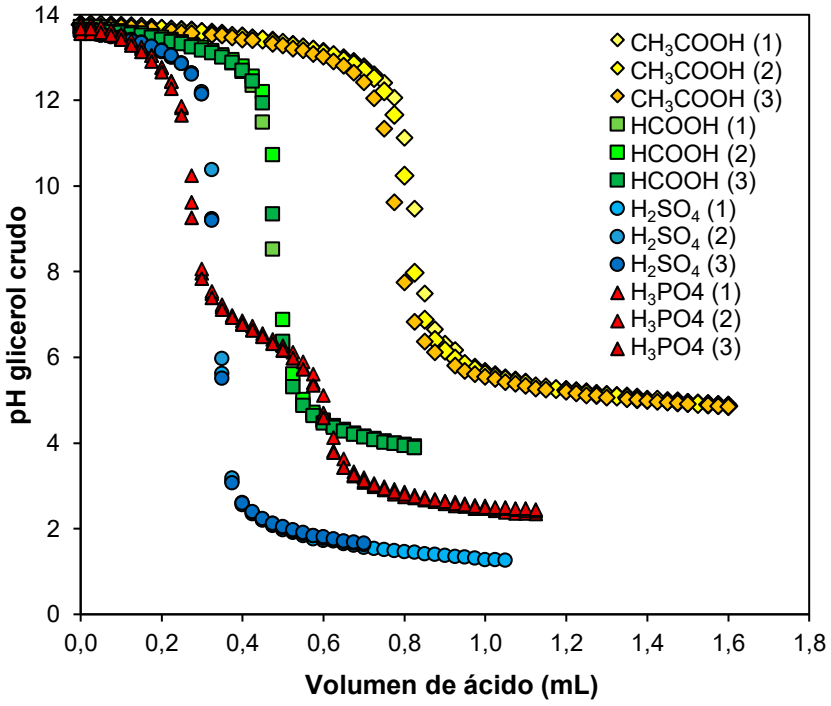


Figura 1. Curvas de titulación ácido-base para las muestras de glicerol crudo alcalino

Como es posible observar, todas las curvas de titulación cortan al eje de ordenadas en pH = 13,80 ± 0.24, que es el pH correspondiente a la muestra de glicerol crudo por la presencia de NaOH. Por otro lado, las curvas muestran diferentes formas, dependiendo del ácido empleado como titulante. En el caso de los ácidos sulfúrico, acético y fórmico, las curvas muestran un único cambio de concavidad, mientras que para el ácido fosfórico se observan dos cambios de concavidad. Cada cambio de concavidad está asociado a un punto equivalente, en donde un protón del ácido es neutralizado por un oxhidrilo de la base presente en el glicerol crudo.
A partir de las curvas de titulación ácido-base se obtuvieron las curvas de la primera derivada para cada ácido (Figura 2).

Para la neutralización con ácido fosfórico (Figura 2 a) se observan dos mínimos característicos a valores de pH de 9,0 y 3,9, correspondientes a consumos de ácido de 0.28 mL y 0.62 mL respectivamente. Estos consumos corresponden a la formación de las especies $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{-2}.
Para el caso de la neutralización con H_2SO_4, HCOOH y CH_3COOH, solo se observa un mínimo característico a valores de pH de 5,7, 7,2 y 7,7 respectivamente, con consumos de ácido de 0,35 mL, 0,49 mL y 0,82 mL. Estos consumos corresponden a la formación de las especies HSO_4^-, $COOH^-$ y CH_3COO^-.

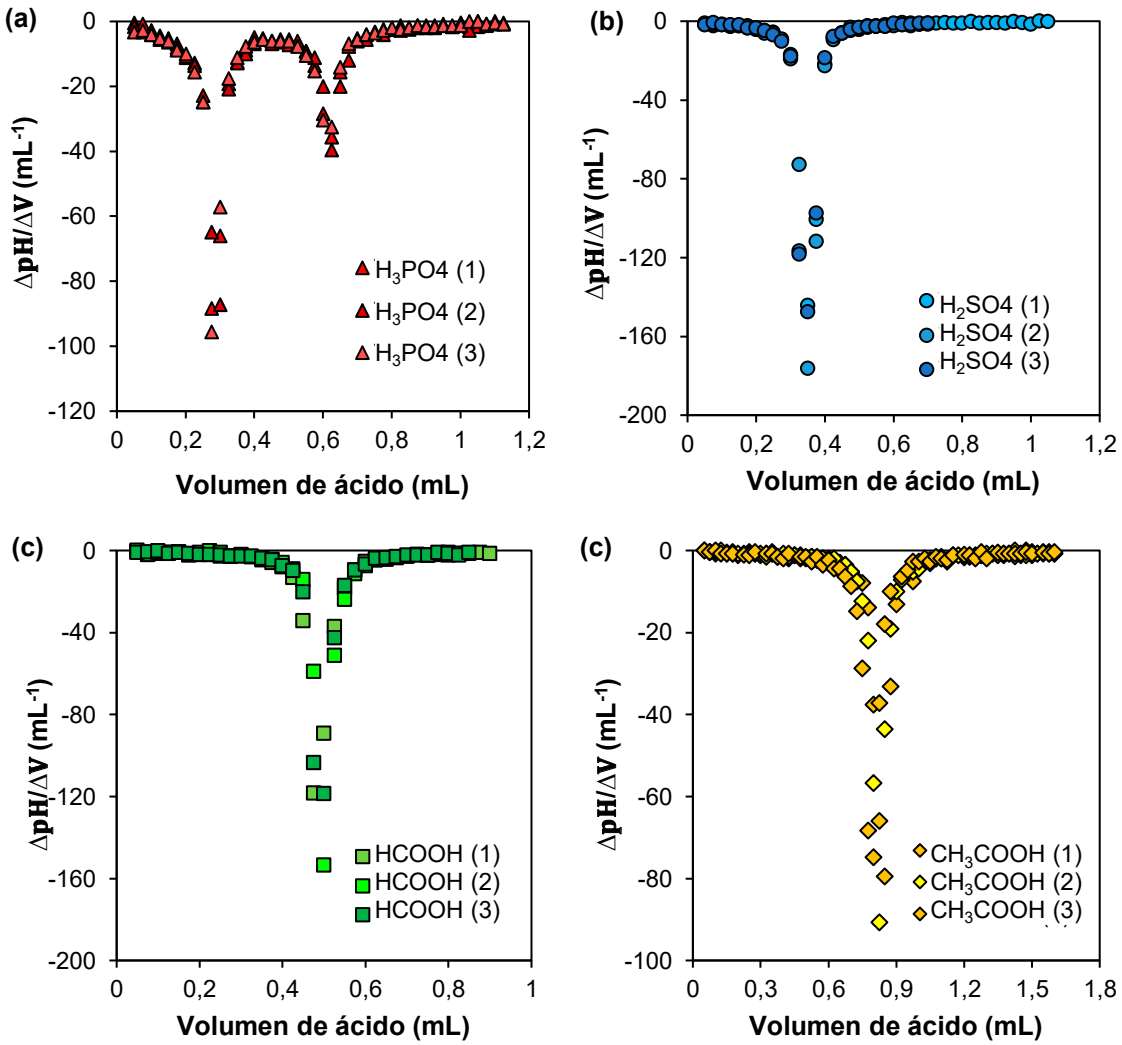


Figura 2. Curvas de la primera derivada obtenida a partir de las curvas de titulación ácido-base para las muestras de glicerol crudo alcalino.

Los valores de pH de los puntos equivalentes y el consumo de ácido correspondiente se presentan en la Tabla 2. Allí también se informa la relación volumétrica necesaria de ácido/glicerol para producir la neutralización y el contenido de sal formada.
Los resultados de la Tabla 2 indican que la neutralización completa se logra a los siguientes valores de pH correspondientes a los puntos equivalentes: 7,74 (CH_3COOH), 7,27 (HCOOH), 5,71 (H_2SO_4) y 3,91 (H_3PO_4). En esas condiciones el consumo total de ácido sigue la tendencia: $CH_3COOH > H_3PO_4 > HCOOH > H_2SO_4$, siendo el ácido sulfúrico el ácido que menos se consume para neutralizar el glicerol crudo alcalino.
Las sales formadas consisten en CH_3COONa, HCOONa, Na_2SO_4 y Na_3PO_4 derivadas de los ácidos correspondientes. El contenido de sal luego de la neutralización sigue la tendencia:

Na_3PO_4 (5,33 %p/p) > Na_2SO_4 (3,77 %p/p) > CH_3COONa (2,04 %p/p) > > HCOONa (1,80 %p/p).

Tabla 2. Consumo de ácido y punto equivalente de las curvas de titulación ácido-base.

Parámetros	Titulante			
	H_3PO_4	H_2SO_4	HCOOH	CH_3COOH
pH del punto equivalente	8,99 ± 0,61 3,91 ± 0,15	5,71 ± 0,18	7,27 ± 0,84	7,74 ± 0,17
Volumen de ácido equivalente (mL)	0,28 ± 0,01 0,62 ± 0,01	0,35 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,82 ± 0,02
Relación ácido/glicerol (%v/v)	3,10 ± 0,05	1,75 ± 0,05	2,45 ± 0,05	4,10 ± 0,10
Contenido de sal formada (%p/p)	5,33 ± 0,10	3,77 ± 0,10	1,80 ± 0,10	2,04 ± 0,10

Las muestras tituladas con H_3PO_4, HCOOH y CH_3COOH fueron cristalizadas a 0 °C, a diferencia de la muestra titulada con H_2SO_4, que debió ser cristalizada a 40 °C debido a la variación de su solubilidad con la temperatura. La cristalización se llevó a cabo a 2 h y 24 h y no se observaron diferencias entre el los contenidos de sales precipitadas en ese rango de tiempo, con lo cual fueron reportados los valores obtenidos a 2 h. La Tabla 3 muestra el grado de recuperación de las sales para las muestras tituladas.

Tabla 3. Grado de recuperación de sales por cristalización.

Temperatura (°C)	Titulante			
	H_3PO_4	H_2SO_4	HCOOH	CH_3COOH
0	14,1 ± 0,1	-	22,4 ± 0,1	35,2 ± 0,1
40	-	77,6 ± 0,1	-	-

Como puede observarse, la mayor recuperación se obtiene para la muestra titulada con H_2SO_4 a 40 °C. Para las otras muestras, el grado de recuperación varía entre 14% y 35%.

Conclusiones

En este trabajo se estudiaron las operaciones de neutralización y cristalización de muestras de glicerol crudo con el objetivo de eliminar la base presente en ellas. Los resultados determinaron que, dependiendo de la naturaleza del ácido, la neutralización completa se alcanza a distintos valores de pH, siguiendo el orden: 7,74 (CH_3COOH), 7,27 (HCOOH), 5,71 (H_2SO_4) y 3,91 (H_3PO_4). En esas condiciones el consumo total de ácido sigue la tendencia: CH_3COOH > H_3PO_4 > HCOOH > H_2SO_4, siendo el ácido sulfúrico el ácido que menos se consume para neutralizar el glicerol crudo alcalino. Las sales formadas consisten en CH_3COONa, HCOONa, Na_2SO_4 y Na_3PO_4 derivadas de los ácidos correspondientes. El contenido de sal luego de la neutralización sigue la tendencia: Na_3PO_4 (5,33 %p/p) > Na_2SO_4 (3,77 %p/p) > CH_3COONa (2,04 %p/p) > > HCOONa (1,80 %p/p). La cristalización a 40 °C durante 2 h permitió recuperar un 77% de la sal formada cuando se utiliza H_2SO_4 como titulante. La cristalización a 0 °C permitió recuperar entre un 14% y un 35% de las sales formadas con los otros titulantes. Para mejorar la recuperación de estas sales se prevé realizar estudios de precipitación empleando distintos solventes.

Bibliografía

[1] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Observatorio de la Bioeconomía. Indicadores del sector. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/observatorio_bioeconomia/indicadores/06/index.php
[2] M. Anitha, S. K. Kamarudin, N. T. Kofli. Chemical Engineering Journal, 295 (2016) 119-130.
[3] I. N. Buffoni, M. N. Gatti, G. F. Santori, F. Pompeo, N. N. Nichio, Hydrogen from glycerol steam reforming with a platinum catalyst supported on a SiO_2-C composite, International Journal of Hydrogen Energy 42 (18) (2017) 12967-12977.
[4] F.M. Perez, M.N. Gatti, G.F. Santori, F. Pompeo, Transformations of Glycerol into High-Value-Added Chemical Products: Ketalization and Esterification Reactions, Reactions 4 (4) (2023) 569–634.
[5] M.N. Gatti, F.M. Perez, G.F. Santori, N.N. Nichio, F. Pompeo, Heterogeneous Catalysts for Glycerol Biorefineries: Hydrogenolysis to 1,2-Propylene Glycol, Materials 16(9) (2023) 3551.
[6] M. Balaraju, V. Rekha, B. L. A. Prabhavathi Devi, R. B. N. Prasad, P. S. Sai Prasad, N. Lingaiah, Appl Catal A Gen 384 (2010) 107-114.
[7] S. Zhu, Y. Zhu, S. Hao, H. Zheng, T. Mo, Y. Li, Green Chem 14 (2012) 2607-2616.
[8] T. Rajkhowa, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 54 (2017) 270-277.
[9] Martin Hájek, F. S. (2010). Treatment of glycerol phase formed by biodiesel production. Bioresource Technology.
[10] Suvra Sadhukhan, U. S. (2016). Production of purified glycerol using sequential desalination and extraction of crude glycerol obtained during trans-esterification of Crotalaria juncea oil. Energy Conversion and Management.

SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO ASOCIADAS A UNA SÍLICE NATURAL Y SUS POTENCIALIDADES ANTIMICROBIANAS

Muruchi Arispe, Eduardo Esteban [(1)], Vasquez, Berenice [(1)], López, Guillermo [(2,3)], Bellotti, Natalia [(2,4)]

Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47 B1900TAG, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT), CONICET, CICPBA, UNLP, Calle 52 e/121 y 122 La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(2) Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47 B1900TAG, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(3) Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Av 122 y 60 B1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

n.bellotti@cidepint.ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de nuevos materiales eco-compatibles con propiedades antimicrobianas es una línea de investigación con intenso desarrollo en la actualidad. Los biocidas (aditivos antimicrobianos) eficientes en la prevención del biodeterioro, tienen como objetivo prevenir el crecimiento de microorganismos como hongos y/o bacterias sobre materiales edilicios [1]. El biodeterioro producido en paredes y techos impacta negativamente en la salud de los habitantes expuestos a los bioaerosoles generados a partir de las biopelículas. Algunos biocidas utilizados en recubrimientos ya no están permitidos como es el caso de los fenilmercuriales mientras que otros han sido sujetos a un uso restrictivo como los aromáticos y/o derivados organohalogenados [2]. En este sentido, el uso de nanomateriales bioactivos obtenidos por síntesis verde para ser aplicados en la formulación de recubrimientos antimicrobianos resulta promisorio debido a sus cualidades específicas dependientes del tamaño. Los óxidos metálicos, y en particular el ZnO, han cobrado gran relevancia en los últimos años debido a sus propiedades únicas y su amplia gama de aplicaciones en diversos campos, desde la fotocatálisis hasta la biomedicina [3, 4]. Las nanopartículas (NPs) de ZnO han demostrado un potencial significativo como agentes antimicrobianos [5]. El mecanismo de acción se asocia frecuentemente en la bibliografía en la liberación de iones de zinc y la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo cual ofrece una alternativa prometedora a los antibióticos tradicionales, especialmente en el contexto de la proliferación de microorganismos resistentes [5]. Por otro lado, la síntesis verde de NPs, utilizando extractos vegetales, ha ganado atención debido a su enfoque ecológico y sostenible. Extractos de cáscaras de frutas como el limón y la naranja resultan promisorios como agentes reductores y estabilizadores en la síntesis de NPs de ZnO dado que se podría reutilizar cáscaras desechadas por la industria alimenticia [4,6]. El uso de soportes silíceos para la funcionalización mediante NPs ha permitido mejorar las propiedades ópticas en el caso del ZnO [7,8]. En este contexto, el presente trabajo explora la síntesis de ZnO NPs asociadas a un soporte silíceo natural como las tierras de diatomeas (TDs) utilizando extractos acuosos de cáscaras de cítricos (limón y naranja) para aplicar en una siguiente fase en la formulación de recubrimientos antimicrobianos.

EXPERIMENTAL

Preparación de los extractos a partir de cáscaras de limón/naranja y caracterización

Se prepararon extractos acuosos a partir de cascaras de limones y naranjas previamente lavadas, secadas en estufa a 45°C y trituradas en un dispositivo especial (Arcano). El extracto se obtuvo agitando por 30 minutos a 80±2ºC, 10g de cáscaras en 200 mL de agua MiliQ. Se

filtró con la ayuda de una bomba de vacío y se llevó a un frasco de color caramelo para su conservación a -4ºC. Se realizaron reacciones con los extractos de los cítricos para evidenciar la presencia de fitoquímicos como: glúcidos (test de Molish), flavonoides (test de Shinoda), fitoesteroles (test de Salkowski), proteínas (test de Biuret), polifenoles (test con $FeCl_3$ y con reactivo de Folin-Denis) y alcaloides (test de Wagner/ácido tánico) [9].

Síntesis de NPs de ZnO asociadas a TD y caracterización

Para la obtención de las partículas se agitaron a 60 ±2°C por 4 horas en un recipiente de vidrio, 100 mL de solución de $Zn(NO_3)_2$ (Sigma-Aldrich) 0.2 M con 100 mL del extracto cítrico y 2.04 g de tierra de diatomeas (TD) comercial [8]. El sólido fue separado del sobrenadante, se secó en estufa para finalmente ser calcinado a 400°C por 3 horas. Finalmente se procedió con la caracterización de los sólidos obtenidos, TZnL (TD/ZnO/limón) y TZnN (TD/ZnO/naranja) mediante: espectrofotometría UV-vis; espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y absorción atómica (AA).

El espectro UV-vis se obtuvo mediante reflectancia difusa sobre un extendido en un soporte de vidrio de cada muestra (TD, TZnL, TZnN) obtenido mediante la mezcla con resina acrílica (0,1g de muestra/mL de resina). A las muestras estudiadas se sumó ZnO NPs comercial (Sigma-Aldrich) como control de referencia. El equipo utilizado fue un espectrofotómetro UV-Vis marca Shimadzu UV-2600/2700 que cuenta con una esfera de integración ISR-2600plus con un rango espectral de entre 220 a 1400 nm.

Los espectros FTIR se obtuvieron utilizando un espectrómetro FTIR Perkin Elmer (Spectrum ONE) en el rango espectral de 4000 a 650 cm^{-1}. El análisis se realizó directamente sobre las muestras empleando la técnica de reflectancia total atenuada con el accesorio U-ATR.

La cantidad de ZnO asociado a la TD se determinó mediante AA a partir del sobrenadante obtenido luego de calentar a 60ºC por una hora las muestras en solución de HCl al 50% (v/v) [10].

Evaluación de la actividad antimicrobiana

Se realizó la evaluación de la actividad antimicrobiana mediante el ensayo de difusión en agar (Kirby-Bauer) frente a las cepas: *Chaetomiun globosum* (KU 936228), *Penicillium commune* (KU936231), *Aspergillus fumigatus* (KU 936230) y *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) [11]. Se prepararon placas con medio en base a extracto de malta agarizado (MEA) para hongos y con Luria Bertani agarizado (LBA) para la cepa bacteriana que fueron inoculadas (10^5 esporas/mL para hongos y 10^6 UFC/mL para bacterias). En hoyos realizados en el medio de cultivo se introdujeron 20mg de cada muestra (TD, TZnL, TZnN). Además, se utilizaron como control discos de papel estéril. El ensayo se realizó por triplicado en cada caso. Las placas fueron incubadas a 30°C por 48 horas en el caso de los hongos y 24 horas para la cepa bacteriana. Al concluir el ensayo se realizaron observaciones mediante microscopio estereoscópico, se tomaron registros fotográficos y se midieron los diámetros (D) de los halos de inhibición (D=7mm indica actividad parcial (+/-) en el caso de hongos y sin actividad (-) para bacterias; D>7mm indica actividad positiva (+) y D< 7 resultan sin actividad (-) en el caso de los hongos) [11].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de los fitoquímicos en los extractos de las cáscaras de limón y naranja mediante reacciones cualitativas convencionales evidenció la presencia positiva (+) de: glúcidos, flavonoides, fitoesteroles y polifenoles. Registrando mayor intensidad en la presencia de glúcidos y fitoesteroles en el caso del extracto de limón. En tal sentido, según bibliografía la presencia de polifenoles y flavonoides permitiría la asociación y estabilización de los iones Zn^{2+} en el sistema de síntesis que eventualmente mediante la calcinación permite la conformación de las NPs de ZnO [12].

A partir de los espectros UV-vis se pudo evidenciar en las muestras sintetizadas, TZnL y TZnN, la aparición de una banda de absorbancia entre 350 y 400 nm en cada caso, característica de las NPs de ZnO como puede observarse en la Figura 1a. El espectro correspondiente fue realizado también sobre una muestra de ZnO NPs comercial con el fin de corroborar la presencia de la banda de absorbancia característica como puede verse en la Figura 1b. El espectro obtenido a partir de la TD sin funcionalizar, Figura 1b, no presentó

ningún pico de absorbancia entre 350 y 400 nm. Resulta notorio que en el caso de las NPs comerciales la absorbancia disminuye abruptamente luego de los 370 nm mientras que en el caso de TZnL y TZnN baja con menor pendiente y mostrando un mayor grado de absorbancia en el rango del visible. Esto podría beneficiar las propiedades dependientes de la fotoactividad de las NPs de ZnO que a su vez podría impactar en forma positiva en la actividad antimicrobiana [5].

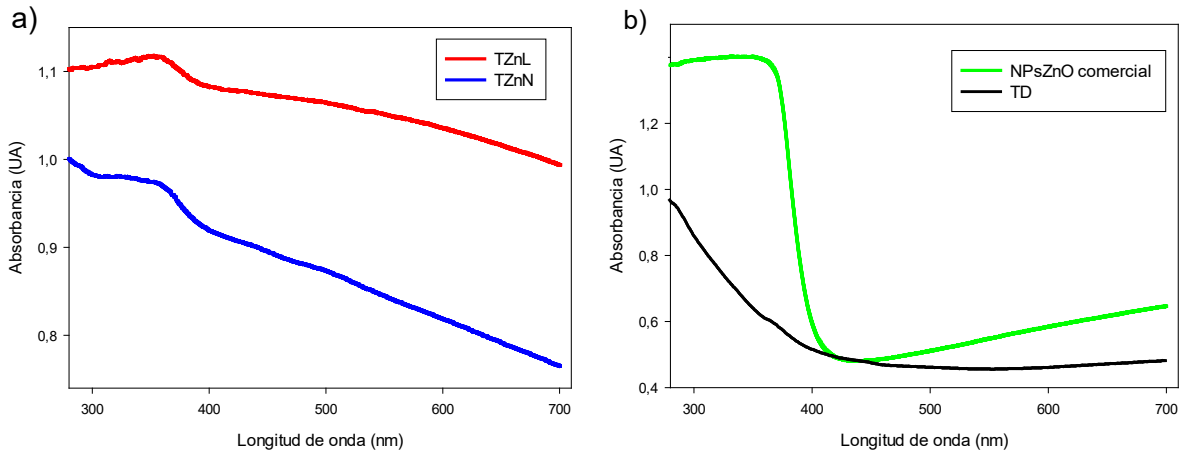


Figura 1. Espectros UV-vis: a) TZnL y TZnN; b) NPs de ZnO comercial y TD sin funcionalizar.

Los espectros de FTIR no mostraron cambios significativos entre los sólidos obtenidos (TZnL y TZN) y la TD sin funcionalizar como puede verse en la Figura 2. Por otro lado, se pudo determinar mediante AA la cantidad de ZnO retenido en la TD siendo de 2,9 y 5,9 % g de ZnO/100g de TD para TZnL y TZnN, respectivamente.

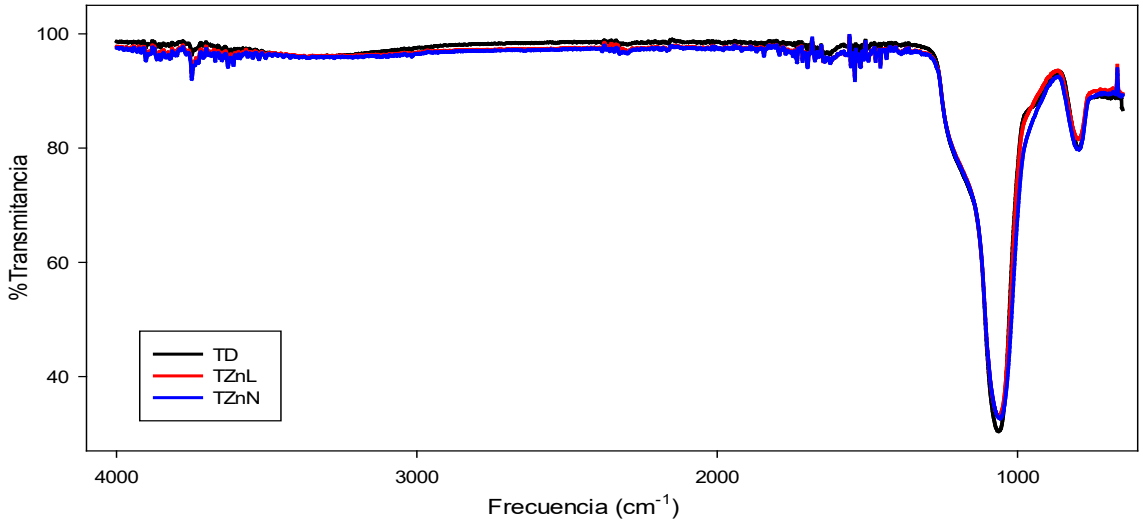


Figura 2. Espectros FTIR de TD sin funcionalizar, TZnL y TZnN.

En la Figura 3 se muestran registros fotográficos obtenidos una vez concluido el ensayo de difusión en agar. La evaluación de la actividad antifúngica de TZnL y TZnN evidenció falta de actividad (-) frente a *C. globosum* (Figura 3a) mientras que una actividad parcial (+/-) frente a *P. commune* y *A. fumigatus* (Figura 3b y c) dado que inhibieron el crecimiento sobre el sólido (D=7mm). La inhibición del crecimiento sobre el material es tenida en cuenta en el caso de los hongos porque tienen un crecimiento diferenciado con respecto a las bacterias, dado que, el crecimiento fúngico se caracteriza por ser invasivo. Los controles (disco de papel estéril)

mostraron crecimiento abundante sobre el material (D<7mm) en todos los casos, al igual que TD, aunque este último menos abundante. Con respecto a la actividad antibacteriana frente a *S. aureus* no se detectó actividad (D=7mm) en ninguna de las muestras como puede apreciarse en la Figura 3D. Los ensayos fueron realizados en condiciones de crecimiento convencional quiere decir en una estufa de cultivo sin exposición a ningún tipo de fuente de luz, por lo tanto, en una siguiente etapa se planea evaluar la actividad antimicrobiana en presencia de luz para estudiar el efecto de la fotoactividad de los sólidos en relación con la bioactividad.

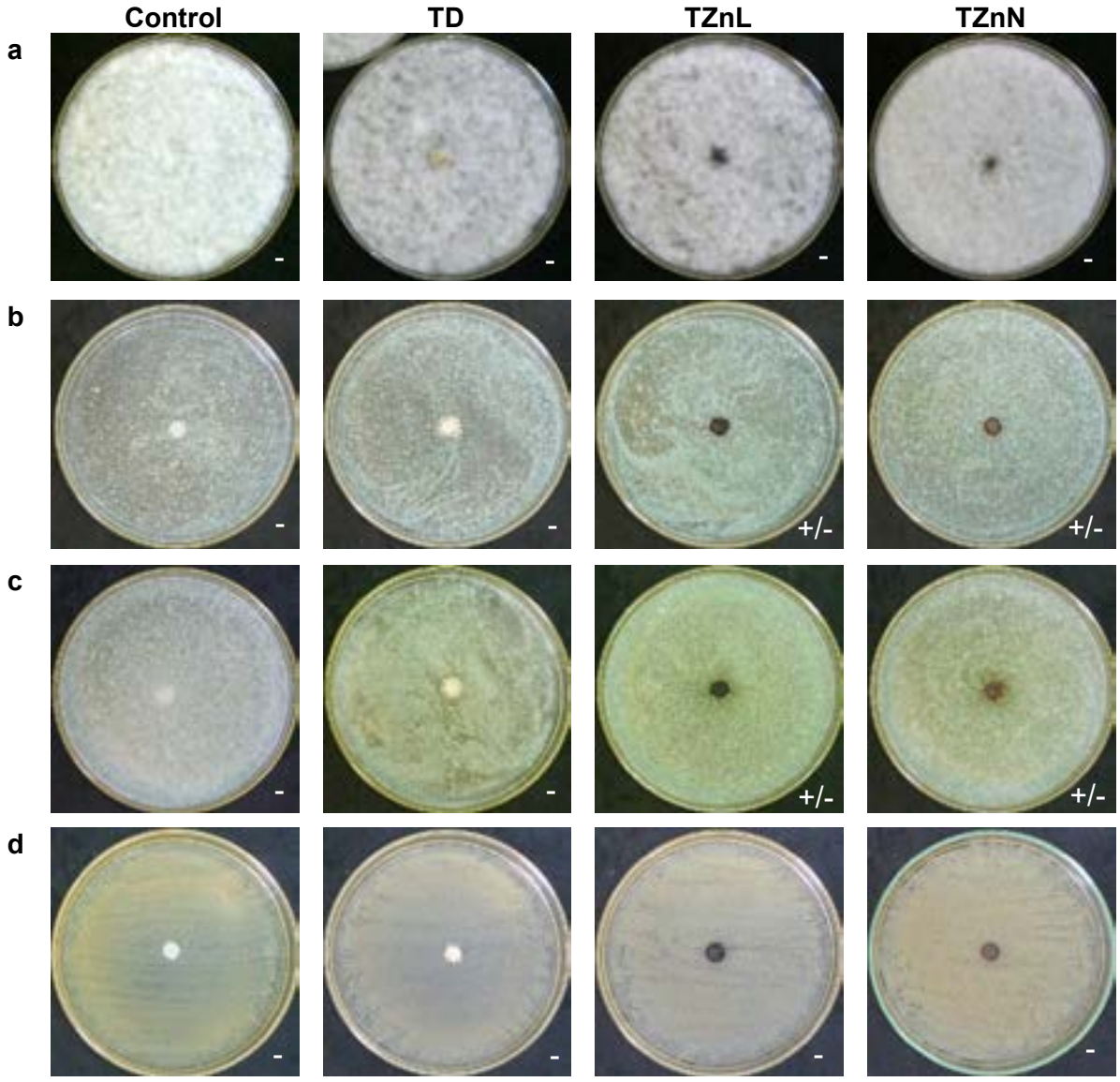


Figura 3. Ensayo de difusión en agar: a) *Chaetomiun globosum;* b) *Penicillium commune*; c) *Aspergillus fumigatus;* d) *Staphylococcus aureus*.

CONCLUSIONES

Fue posible obtener TDs funcionalizadas con partículas de ZnO mediante síntesis verde, la presencia de NPs fue corroborada mediante espectrofotometría UV-vis. La síntesis con extracto de cáscara de naranja se mostró más eficiente dado que la TD contuvo aproximadamente el doble de ZnO que en el caso de la obtenida con cáscaras de limón. Tanto

TZnL y TZnN mostraron cierta actividad antifúngica. En una siguiente etapa se prevé terminar de corroborar la presencia de NPs con el empleo de otras técnicas de microscopía como microscopía electrónica de transmisión (TEM) y profundizar en el estudio de sus propiedades antimicrobianas. Además, se prevé integrar los sólidos obtenidos a una formulación de pintura.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. G. Puri et al., Industrial Microbiology and Biotechnology, Chapter 20, pp 605-633 (2024).
[2] P. Dileep et al., Progress in Organic Coating, 142,105574 (2020).
[3] F. R. Lamastra et al., Nanotechnology 28, 375704 (2017).
[4] O. J. Nava et al., Journal of Molecular Structure 1147, 1–6 (2017).
[5] M. Maruthupandy et al., Microbial Pathogenesis 121, 224–231 (2018).
[6] F. R. Lamastra et al., Nanotechnology 28, 375704 (2017).
[7] Z. Qiao et al., Sensors and Actuators: B. Chemical 346, 130487 (2021).
[8] G. F. Aaga et al., Journal of Environmental Chemical Engineering, 11, 110982 (2023).
[9] T. Rehman et al., Biochemistry & Analytical Biochemistry, 7,1000368 (2018).
[10] Norma IRAM 1415. Pigmentos e inertes para pinturas. Métodos de determinación de cinc.
[11] L. Barberia-Roque et al., Nano-Structures & Nano-Objects, 36, 101055 (2023).
[12] S. Ahmed et al., Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology, 166, 272-284 (2017).

OBTENCIÓN DE HIDROGENO POR REFORMADO DE GLICERINA EN FASE VAPOR

Volpe Giangiordano, M. Florencia*; Lopez van der Horst, Juliana; Pompeo, Francisco

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 50 Nº 184, La Plata, Argentina.
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA), Calle 47 Nº 257, La Plata, Argentina.
*email: florencia.volpe@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Argentina produce actualmente 0,4 Mt de “hidrógeno gris” al año para consumo interno, lo que representa el 9% del mercado de América Latina y aproximadamente el 0,4% de la demanda global. El hidrógeno gris se obtiene mediante el reformado de gas natural con vapor de agua, proceso que se lleva a cabo a elevadas temperaturas (~900ºC) y que contribuye con la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido, la producción de “hidrógeno verde” a partir de fuentes renovables como la biomasa tendrá un importante efecto sobre lo ambiental, debido a la menor emisión de gases de efecto invernadero. Dentro de las materias primas disponibles provenientes de biomasa, la glicerina, principal subproducto en la producción de biodiesel de primera generación es una alternativa interesante debido a su alto contenido en hidrógeno, bajo costo, sencillo almacenamiento y transporte.
El reformado de glicerol con vapor de agua (steam reforming) puede llevarse a cabo a presión atmosférica, lo que favorece una selectividad a hidrógeno comparada a la obtenida con el reformado en fase acuosa. La conversión a gas de síntesis (mezcla H_2+CO) es posible mediante la reacción de descomposición de glicerol:

Reacción de descomposición: $C_3H_8O_3 \overset{H_2O}{\longleftrightarrow} 3CO + 4H_2$

La máxima cantidad de hidrógeno que se puede obtener es de cuatro moles por mol de glicerol. Sin embargo, en condiciones de reformado con vapor, la reacción de gas de agua (WGS) puede ocurrir simultáneamente y se podrían generar 7 moles de H_2 por mol de glicerol, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Reacción de Water-Gas Shift: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
Reacción global (reformado con vapor): $C_3H_8O_3 + 3H_2O \leftrightarrow 3CO_2 + 7H_2$

Los metales que pueden utilizarse como catalizadores para la reacción de reformado con vapor son aquellos que posean la capacidad de romper los enlaces C-C, O-H y C-H de la molécula que se va a reformar. Así, se reportan en la literatura catalizadores basados en Pt, Ni, Ru, Re, Rh, Ir, Co y Pd. El Ni es uno de los metales más investigados debido a su menor costo, a pesar de que los resultados indican que el Pt, Ru, Ir y Rh son más activos [1].
En nuestros primeros estudios sobre este tema, evaluamos el rendimiento de catalizadores de Ni soportados sobre α-Al_2O_3 y α-Al_2O_3 modificado por CeO_2 y ZrO_2 a temperaturas superiores a 600ºC, encontrando que el sistema más estable resultó ser Ni/CeO_2/α-Al_2O_3. Estos resultados se explicaron debido al efecto del Ce en la inhibición de reacciones secundarias que forman hidrocarburos insaturados que son precursores del coque [2]. El reto consiste en encontrar catalizadores activos, selectivos y estables para el reformado de glicerol con vapor de agua a baja temperatura, lo que permitiría reducir el consumo energético. Así, este proceso tendría un consumo energético inferior al de la descomposición convencional del glicerol que ocurre en el rango de 550-750ºC.

En este trabajo se realizó un estudio comparativo de catalizadores de Ni y Pt soportados sobre SiO_2. El objetivo de este estudio fue obtener catalizadores con contenidos metálicos superiores al 1% p/p utilizando el método de intercambio iónico con el fin de analizar las características estructurales y sus efectos sobre las reacciones principales y secundarias en el reformado con vapor. También se estudió un sistema bimetálico Ni-Pt. Por último, se analizaron las muestras post-reacción mediante TPO/TGA para determinar la influencia de la deposición de carbono en la desactivación del catalizador.

Experimental

Los catalizadores fueron preparados por intercambio iónico de modo de obtener 1 % y 2% en peso de Pt (denominados1Pt y 2Pt respectivamente). Los catalizadores de Ni fueron preparados de manera de obtener 2% y 5% en peso (2Ni y 5Ni), mientras que el catalizador bimetálico 0.5Pt2Ni fue preparado intercambiando primero Pt y luego Ni, de manera de obtener 0.5 % en peso de Pt y 2% en peso de Ni en el sólido final. Posteriormente fueron secados a 120ºC durante 12 h y calcinados en aire a 500ºC durante 4 h. Los ensayos de reducción a temperatura programada (TPR) fueron realizados en un equipo dinámico convencional con una relación H_2/N_2 en la alimentación de 1/9 y velocidad de calentamiento de $10°min^{-1}$ desde temperatura ambiente hasta 1000°C. Las medidas de tamaño medio de partícula determinadas por TEM se obtuvieron en un equipo TEM JEOL 100 C, operado a 200 KV. Las medidas de quimisorción de H_2 fueron realizadas en un equipo dinámico con detector TCD. Las muestras fueron reducidas en hidrógeno a 500ºC para Pt y 700ºC para Ni, durante 1 h, luego tratadas en corriente de Ar durante 2 h. Finalmente las muestras fueron enfriadas hasta temperatura ambiente en flujo de Ar e inyectados pulsos de hidrógeno hasta alcanzar la saturación. A partir de la cantidad de hidrógeno consumida se estimaron las dispersiones, asumiendo una estequiometría de adsorción H/Me=1 (Me=Pt, Ni). El equipo experimental utilizado para los ensayos de la reacción de reformación de glicerol consiste en un reactor de lecho fijo construido en cuarzo operado isotérmicamente a presión atmosférica. Las muestras de Pt fueron reducidas desde temperatura ambiente hasta 500°C durante 1 hora en flujo de H_2 puro (30 cm^3min^{-1}), mientras que las muestras de Ni a 700ºC durante 4 horas. Se alimentó al reactor una solución acuosa al 10% p/p de glicerol por medio de una bomba HPLC Waters 590. El nitrógeno fue usado como gas de barrido. La composición de los gases producidos por la reacción fue determinada por cromatografía gaseosa con detector TCD, utilizando una columna rellena HayeSep DB 110-120 de 10 m de longitud. Las muestras sin condensar y las muestras líquidas fueron analizadas por cromatografía gaseosa con detector FID (columna capilar SPB-50) y por cromatografía gaseosa con detector de espectrometría de masas CG/MS (Shimadzu GCMS-QP5050A) con columna de separación cromatográfica capilar HP-PONA de 50 m de longitud. La conversión de glicerol (X_G%) está calculada en base a los productos gaseosos (X_G%= moles de C en fase gasx100/3x moles de glicerol alimentados). La distribución de productos gaseosos se calculó como %mol/mol en base seca. La estabilidad fue expresada como coeficiente "*a*" calculado como la relación entre conversión de glicerol a tiempo "t" dividida la conversión inicial de glicerol.

Resultados y Discusión

En la **Tabla I** se presentan los catalizadores estudiados, su denominación y algunos resultados correspondientes a la caracterización. Los resultados de las medidas TEM, indican que la distribución de tamaños de partículas es muy estrecha y centrada en alrededor de 2-3 nm. Los resultados de quimisorción de hidrógeno por el método de pulsos (**Tabla 1**), revelan que las muestras de Pt presentan mayor dispersión metálica que las de níquel.

Catalizador	TEM dva (nm)	TPR Temperatura (ºC)		TPR Reducibilidad# (%)	H_2 quimisorción Relación H/Me (Me=Pt, Ni)
		BT*	AT*		
1Pt	2.4	110	410	90	0.6
2Pt	2.2	155	410	90	0.6
2Ni	3.0	350	470-600	90	0.2
5Ni	4.0	337	475-590	80	0.1
2Ni0.5Pt	3.5	285	457-573	90	0.1

Tabla 1. Caracterización de los catalizadores. *BT: pico baja temperatura, AT: pico alta temperatura.

Todos los perfiles de reducción obtenidos por TPR (no se muestran en este trabajo) revelan la existencia de dos picos principales de consumo de hidrógeno. Tal como se ha citado en la bibliografía referida a catalizadores de Pt, esto indica la presencia de dos tipos de óxidos de platino, con débil interacción con el soporte que se reduce por debajo de 220ºC, y con fuerte interacción con el soporte cuando el consumo hidrógeno es a partir de 350ºC [3]. Los sistemas de níquel, con un pico de reducción principal a alta temperatura, mostraron alta interacción con el soporte. Esto es consecuencia del método de preparación que conduce a la formación de hidrosilicatos de níquel [4]. Para el sistema bimetálico se observó un solo pico de consumo de hidrógeno a una temperatura de 288ºC indicando que el Pt está interactuando con el Ni.
El reformado del glicerol con vapor de agua se estudió en las condiciones indicadas en la sección experimental. En primer lugar, se realizaron ensayos en blanco para determinar la descomposición térmica de la solución de alimentación (10% en peso de glicerol).
Con un soporte de SiO_2 y para un intervalo de temperaturas de 350-450ºC, la descomposición del glicerol fue inferior al 5% molar. Los principales productos de descomposición fueron acetol, 2-oxopropanal y acetaldehído.

Ensayo No.	Catalizador	Temp. [ºC]	τ [min]	X_{total}	X_G [%]	X_L	Composición [% mol/mol (base seca)]			
							H_2	CO	CH_4	CO_2
1	1Pt	350	0.44	75	46	29	59.8	38.1	1.0	1.10
2	1Pt	350	0.88	88	85	3	57.2	40.4	1.2	1.20
3	1Pt	350	1.66	100	100	0	62.1	28.8	1.1	8.00
4	2Pt	350	0.44	84	81	3	54.5	42.6	1.0	1.90
5	2Pt	350	0.88	100	100	0	62.3	22.4	0.9	14.4
6	2Ni	350	0.88	38	32	6	62.1	31.1	1.1	5.70
7	5Ni	350	0.88	78	53	25	60.8	28.4	1.1	9.70
8	1Pt	450	0.88	100	100	0	58.0	40.0	0.7	1.30
9	2Pt	450	0.88	100	100	0	70.0	6.40	0.5	23.1
10	2Ni	450	0.88	48	42	6	68.2	15.5	0.8	15.5
11	5Ni	450	0.88	100	78	22	66.0	17.0	2.0	15.0
12	5Ni	450	1.66	100	80	20	70.0	3.00	2.0	25.0
13	2Ni0.5Pt	450	0.88	71	51	20	60.5	31.3	1.3	6.90

Tabla 2. Resultados de actividad en la reacción de reformado de glicerol con vapor de agua. Datos recolectados después de 2 horas de reacción.

Los resultados de la actividad catalítica se muestran en la **Tabla 2**. En esta tabla se representan la conversión a productos gaseosos (X_G), la conversión a productos líquidos (X_L), la conversión total (X_{total}) y la composición de los productos gaseosos en base seca (H_2, CO, CO_2 y CH_4, en % molar).
En primer lugar, se observa que el catalizador de Ni alcanza una conversión total inferior a la del catalizador de Pt en las mismas condiciones experimentales. En cuanto a la distribución de los productos gaseosos, el CO aparece como producto primario. A medida que aumenta el

tiempo espacial de 0,44 a 1,6 min, se observa un aumento de la producción de CO_2 e H_2 a expensas de la disminución de CO (ensayos nº 1-3). El CH_4 no presenta cambios apreciables. Con valores de conversión total similares (véanse los ensayos nº 1 y 7), el Ni presenta una mayor selectividad a CO_2, lo que evidencia la mayor contribución de la reacción Water-Gas Shift.

Para analizar el efecto del contenido metálico, se han utilizado los resultados de los ensayos nº 2 y 4 que muestran niveles similares de X_G y X_L, esto podría indicar que estos catalizadores mantienen la misma fase activa con el aumento del contenido metálico. Esto concuerda con los resultados de la caracterización, que indican la misma dispersión metálica y el mismo tamaño medio de las partículas de ambos catalizadores. Con respecto a la temperatura, se produjo un aumento de la selectividad a H_2 y CO_2 por la contribución de la reacción Water-Gas Shift, cuando se aumenta de la temperatura de 350 a 450ºC (ensayos nº 6 y 10). El catalizador de 5Ni a 450ºC no alcanza la conversión total a gas (X_G = 80%), incluso para el mayor tiempo espacial estudiado (ensayo nº 12).

La adición de Pt al catalizador 2Ni para generar el catalizador bimetálico 2Ni0,5Pt no mejoró el rendimiento catalítico (ensayo nº 13). Aunque la conversión total aumentó, no fue posible conseguir la conversión total a gases. Esto indicaría que la fase bimetálica afecta a las propiedades electrónicas del Pt, reduciendo su capacidad de escisión de los enlaces C-C. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por quimisorción de H_2, donde el catalizador 2Ni0,5Pt mostró un menor consumo de H_2 menor que el catalizador de 2Ni.

El análisis de los productos líquidos mostró los mismos intermedios de reacción con Ni, Pt y NiPt. Los principales productos fueron 1,3-dihidroxi-2-propanona, 1-hidroxi-2-propanona, 2-oxopropanal, 2,3-dihidroxi-propanal, 1,2-etanodiol, hidroxi-acetaldehído y acetaldehído.

La **Tabla 3** muestra la distribución de los productos líquidos obtenidos para los catalizadores 1Pt, 5Ni y 2Ni0,5Pt, a partir de los ensayos no. 1, 7 y 13, para un nivel de conversión similar (entre 70 y 80%). Estos resultados indican que los catalizadores Ni y NiPt tienen las mismas vías de reacción y que pueden explicarse a partir de la representación esquemática de las vías de reacción propuestas para Pt/SiO_2 (**Fig. 1**) [1].

	1Pt (Ensayo nº1) (%)	2Ni0.5Pt (Ensayo nº13) (%)	5Ni (Ensayo nº7) (%)
acetaldehído	8	10	20
2-oxopropanal	1	5	3
hidroxi-acetaldehído	5	4	3
1-hidroxi-2-propanona	3	3	8
1,2-etanodiol	68	68	54
1,3-dihidroxi-2-propanona	10	3	6
2,3-dihidroxi-propanal	5	7	6

Tabla 3. Distribución de productos líquidos para 1Pt, 5Ni and 2Ni0.5Pt.

La vía de reacción [I] de este esquema indicaría un primer paso de deshidratación que conduce al acetol. Como hemos demostrado anteriormente, las propiedades neutras del SiO_2 no favorecen la deshidratación del glicerol, por lo que esta vía es la de menor contribución. En la vía de reacción [II] el primer paso implicaría una deshidrogenación que llevaría a la formación de 1,3-dihidroxi-2-propanona, o 2,3-dihidroxi-propanal. La conversión de acetona a aldehído ha sido reportada por estudios FTIR [5].

A partir de estos primeros intermedios se produce una secuencia de reacciones de descarbonilación y deshidrogenación debido a la ruptura de los enlaces C-C. La principal contribución de la vía de reacción [II] es evidente a partir de la relación H_2/CO obtenida con tiempos espaciales y temperaturas más bajos. Además, debido al bajo contenido de CH_4 en los productos gaseosos, es razonable pensar que la escisión C-C predomina sobre la escisión C-O.

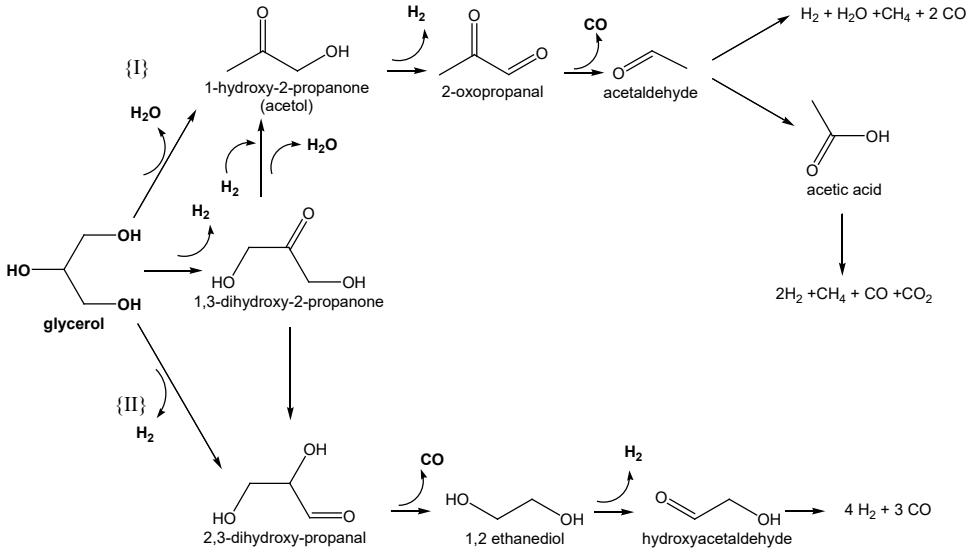


Figura 1. Vías de reacción esquemáticas para la producción de H_2 mediante reformado con vapor de glicerol.

La **Figura 2** y la **Tabla 4** muestran los resultados de la actividad en función del tiempo de reacción a 350 y 450ºC determinados para un tiempo de residencia τ = 0,88 min. A 450ºC, los catalizadores 2Pt y 1Pt se mantuvieron estables durante 40 h de reacción con un coeficiente de actividad (a_s) cercano a 1. El catalizador de 5Ni mostró menos estabilidad, con a_s = 0,7 a las 20 h de reacción y 450ºC. Por último, los catalizadores 2Ni0,5Pt y 2Ni presentaron la mayor desactivación con a_s=0,5 y 0,6 respectivamente en 8 h de reacción a 450ºC.

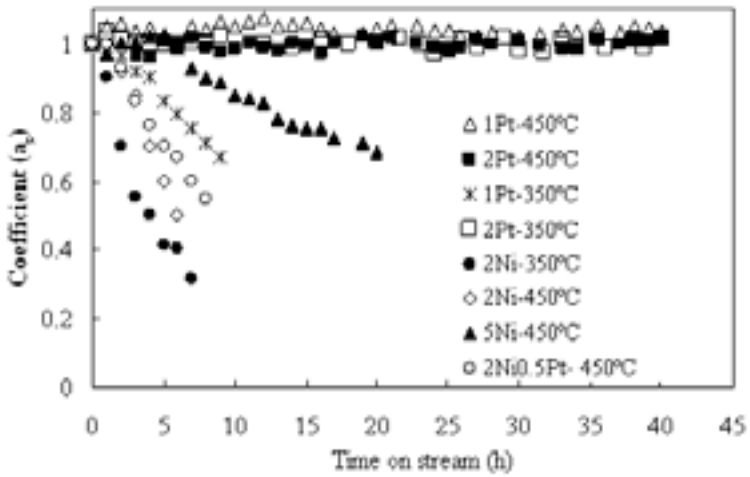


Figura 2. Resultados de la actividad en función del tiempo de reacción a 350 y 450ºC (τ= 0,88 min).

Los análisis TPO/TGA de las muestras postreacción permitieron determinar el contenido de carbón depositado (**Tabla 4**). Los catalizadores de Pt mostraron muy poco carbón depositado (<2 %p/p) en comparación con los catalizadores de Ni (8-15 %p/p). En la bibliografía, la temperatura de oxidación se ha correlacionado con la morfología de los depósitos de carbón. Las pérdidas de peso que se producen en el análisis TPO/TGA a temperaturas entre 250ºC y 480ºC corresponden a especies de carbón altamente reactivas. El carbón que presenta una alta reactividad a la oxidación se encuentra sobre o muy cerca de la partícula metálica. Las temperaturas de oxidación del carbón superiores a 480ºC indican carbón de menor reactividad y la formación de una estructura más ordenada.

Catalizador	Temperatura (ºC)	Tiempo de reacción (h)	Coeficiente de actividad a_s*	C depositado (TPO/TGA) % wt
1Pt	350	9	0.7	1.8
2Pt	350	40	1	1.3
2Ni	350	7	0.3	8
1Pt	450	40	1	1.2
2Pt	450	40	1	1.4
5Ni	450	20	0.7	14.5
2Ni	450	7	0.5	9.5
2Ni0.5Pt	450	8	0.6	12

Tabla 4. Resultados de la actividad catalítica y del contenido de carbón en las muestras post-reacción determinado por TPO/TGA.

El estudio TPO/TGA para el catalizador 5Ni muestra que el carbón se elimina entre 400ºC y 640ºC [6]. Se observa que la pérdida de peso del 5% (a 480ºC) correspondería al tipo de carbón amorfo o especie polimérica. Este tipo de depósito encapsulante tiene un fuerte carácter desactivante. Además, la pérdida de peso del 9,5% (a 586ºC) podría asignarse a la baja reactividad del carbón y a una estructura más ordenada. Para la muestra 1Pt, se observaron pérdidas de peso a 80, 140 y 523ºC. De éstas, sólo la señal a 523ºC pudo asignarse a la oxidación del carbón. Las pérdidas de peso de 80ºC y 140ºC podrían corresponder a especies intermedias de reacción quimisorbidas, que pueden ser responsables de la rápida desactivación de esta muestra (véase la Fig. 2), a pesar del muy bajo contenido de carbón de esta muestra.

Conclusiones

En este trabajo se han estudiado diferentes catalizadores de Ni y Pt soportados sobre SiO_2. El estudio de las condiciones experimentales para la reacción de reformado con vapor de glicerol ha demostrado que utilizando catalizadores de 1Pt y 2Pt es posible conseguir una conversión completa a gases a 350ºC con un tiempo espacial mínimo de 1,66 y 0,88 min, respectivamente. Los mejores resultados se obtuvieron con 2Pt a 450ºC y τ = 0,88 min, produciendo una corriente completamente gaseosa de 70% de H_2, 6,4% de CO, 0,6% CH_4 y 23% CO_2.
Los catalizadores de Ni muestran diferencias significativas en la selectividad de los productos gaseosos debido a que el Ni cataliza la reacción WGS para eliminar el CO adsorbido en la superficie del catalizador transformándolo en CO_2. El catalizador de 5Ni a 450ºC y τ = 1,66 min permitió obtener sólo un 3% de CO.
La adición de Pt al catalizador de 2Ni no mejoró el rendimiento catalítico, lo que sugiere que la formación de una fase bimetálica afectaría a las propiedades electrónicas del platino. Los ensayos de estabilidad demostraron que el catalizador de 2Pt permite obtener una conversión total a gases sin desactivación durante 40 h de reacción a 350ºC. Se comprobó que tanto el catalizador de 2Pt como el de 1Pt son estables a 450ºC.

Referencias

[1] F. Pompeo, G.F. Santori, N.N. Nichio, Int. Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) 8912.
[2] I. Buffoni, F. Pompeo, G.F. Santori, N.N. Nichio, Catalysis Communications 10 (2009) 1656.
[3] I. Buffoni, M. Gatti, G. Santori, F. Pompeo, N. Nichio. Int. Journal of Hydrogen Energy, 42, 18, (2017)12967.
[4] O. Clause, L. Bonneviot, M. Che. J. Catal. 138, (1992) 195.
[5] V.A. Yaylayan, S. Harty-Majors, A.A. Ismail, Carbohydrate Research 318 (1999) 20–25.
[6] D. Duprez, M. Demicheli, P. Marecot, J. Barbier, O. Ferretti, E. Ponzi, Studies in Surface Science and Catalysis 68 (1991) 195.

DESARROLLO DE CATALIZADORES ANÓDICOS BASADOS EN PEROVSKITAS PARA CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO

Volpe Giangiordano M. Florencia*, Toscani Lucia M., Pompeo Francisco

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP. Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA) - Laboratorio Calle 50 Nº 184, 1900, La Plata, Argentina.
*e mail: florencia.volpe@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Las pilas de combustible de óxido sólido (SOFCs) se presentan como una alternativa prometedora para generar energía con elevada eficiencia y bajas emisiones de gases, entre otras ventajas, dentro de las que también se destaca la flexibilidad operativa que permite al admitir una amplia variedad de combustibles [1-3]. En el ánodo de una SOFC tiene lugar la oxidación del combustible, con lo cual, para mejorar el rendimiento del dispositivo, el material del ánodo debe presentar varias características que lo conviertan en apto: un desempeño electroquímico adecuado, alta conductividad electrónica, coeficientes de dilatación térmica compatibles con el electrolito y, en el caso de que se utilicen combustibles hidrocarbonados, es muy deseable que sea catalíticamente activo y selectivo a la reacción química de oxidación del combustible alimentado.
Los cermets (compuestos metal-cerámicos) basados en Ni y, especialmente, el Ni-YSZ (óxido de circonio estabilizado con óxido de itrio) se utilizan tradicionalmente como ánodos de las SOFC, aunque siguen presentando numerosos inconvenientes, como la formación de depósitos de carbono, el envenenamiento por azufre y la baja estabilidad redox [4]. Por ello, se ha dedicado un gran esfuerzo al desarrollo de nuevos materiales como alternativa a los ánodos convencionales. Los óxidos de tipo perovskita con la fórmula general ABO_3 han sido ampliamente estudiados y se utilizan en una gran variedad de aplicaciones debido a su enorme versatilidad. En particular, la gran estabilidad de la estructura perovskita en comparación con otras disposiciones cristalinas y su capacidad, dada la correcta selección de los cationes A y B, de mantener una gran concentración de vacantes de oxígeno la convierten en un buen candidato como electrodo en aplicaciones de pilas de combustible de óxido sólido (SOFC). En los últimos años, se han publicado varios trabajos sobre el uso de perovskitas como materiales anódicos, destacando su estabilidad estructural en atmósferas redox, su bajo costo y su elevada estabilidad mecánica y térmica [4-6]. Sin embargo, es necesaria una mayor optimización de estas estructuras con el objetivo de desarrollar materiales eficientes, especialmente en términos de actividad catalítica y conductividad electrónica, ya que las pilas de combustible basadas en perovskitas siguen proporcionando una menor densidad de potencia en contraste con los cermets de Ni tradicionales [2,6].
El presente trabajo se centra en la preparación, el estudio y la caracterización catalítica y electroquímica de sólidos basados en dos tipos de perovskitas: el titanato de níquel ($NiTiO_3$) y el niquelato de lantano ($LaNiO_3$).

Parte experimental

Síntesis de los catalizadores

El titanato de níquel (NTO) fue preparado por el método de sales fundentes utilizando NiO, TiO_2 (anatasa), NaCl y KCl de grado analítico como productos químicos precursores [7]. Se

calcinó la muestra a 850°C durante 12 horas, y luego se lavó varias veces con agua destilada para eliminar las sales remanentes. Parte de la muestra calcinada se impregnó a humedad incipiente con solución acuosa de $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ un hasta lograr un 5 % en peso Ni en NTO, y luego de la calcino a 1000°C durante 6 horas. A este solido se lo denominó N-NTO.
El niquelato de lantano (LNO) fue preparado por el método de la combustión, a partir de $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$, $La(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ y urea de grado analítico como productos químicos precursores [8]. Posteriormente, se calcinó el sólido en la mufla a 900 °C para dar lugar al LNO.

Ensayos de reacción

Los ensayos de reacción para la oxidación parcial de metano (POM) y para el reformado oxidativo (Rox) se llevaron a cabo en un equipo de flujo continuo constituido por un reactor tubular de cuarzo (i.d. = 8 mm) que opera bajo presión atmosférica, con un sistema de condensación de gases aguas abajo.
Las pruebas de actividad se realizaron a 800 °C, utilizando dos mezclas de alimentación de composición similar a las reportadas en bibliografía para este tipo de reacción química, con motivo de investigar el efecto de variar las concentraciones de reactivos en el desempeño del sólido catalítico.
Para la POM se utilizó una mezcla de alimentación de composición clásica $N_2/CH_4/O_2$ = 7:2:1, con una velocidad espacial (GHSV) de 180 L $h^{-1}g^{-1}$.
La mezcla de alimentación utilizada para el ROx se preparó de manera que su composición sea la correspondiente a un biogás estándar (aproximadamente 60% de CH_4 y 40% de CO_2), mezclado con aire, resultando una mezcla $CH_4/CO_2/O_2/H_2O/N_2$ =1/0.7/0.1/0/3.4. Se empleó en este caso una velocidad espacial de 280 L h^{-1} g^{-1}.
Los caudales de metano, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno fueron manipulados a partir de controladores de flujo másico (Bürkert, modelo 8741). En cuanto al vapor de agua, se bombearon caudales definidos de agua destilada mediante una bomba Waters 590 HPLC. La corriente de agua circula primero a través de un horno vaporizador a 170 °C y luego mezcla con la corriente gaseosa antes de entrar al reactor. La masa de catalizador empleada en todos los casos fue de 30 mg, la cual se diluyó en una proporción 1/10, utilizando alfa alúmina como sólido inerte con motivo de evitar o minimizar la presencia de puntos calientes.
Antes de cada reacción el catalizador fue sometido a un proceso de reducción para el cual se hizo circular por el lecho 70 ml/min de H_2 puro, se calentó el mismo hasta 800°C y se mantuvo a esa temperatura durante 1 hora.
Las pruebas de estabilidad fueron realizadas durante más de 50 horas a 800°C.
Para la cuantificación y el análisis de los gases se utilizó un cromatógrafo de gases Shimadzu GC-8A equipado con una columna Hayesep D y un detector TCD conectado en línea a la unidad experimental.

Ensayos electroquímicos

Las mediciones de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) se realizaron con un potenciostato/galvanostato Autolab PG-GT con módulo analizador de frecuencia. Los experimentos se llevaron a cabo en el rango de 1 MHz a 20 mHz con una amplitud AC de 20 mV. Los ensayos electroquímicos se realizaron con un flujo total de alimentación de 50 cm^3 (STP) min^{-1} de hidrógeno con una humedad relativa del 3 mol%.
Con el objetivo de evaluar la resistencia de polarización de los materiales de electrodo, se realizaron experimentos de EIS en configuración de celda simétrica (ánodo/electrolito/ánodo). Las celdas simétricas a base de NTO se prepararon depositando este material sobre discos sinterizados de polvo comercial SDC (óxido de cerio dopado con un 20% de Sm_2O_3, Fuel Cell Materials), el cual oficia de electrolito. Los electrodos se prepararon mezclando polvos de NTO o N-NTO con un aglutinante (Decoflux WB41, ZS) y depositando la pasta obtenida sobre

ambas caras del electrolito SDC. El electrodo se calcinó a 1000 °C durante 2 h y se pintó encima una rejilla de Pt (tinta de Pt, SPI) para mejorar la colección de corriente.

Para preparar las celdas simétricas construidas con electrodos a base de LNO, se depositó este material sobre discos sinterizados de polvo comercial de GDC ($Gd_{0.10}Ce_{0.90}O_{1.95}$, Fuel Cell Materials), el electrolito en este caso. Los electrodos se prepararon previamente mezclando el polvo de LNO con el material de electrolito en una relación 60%LNO-40%GDC.

Para evaluar la performance de los materiales de electrodo en condiciones operativas, se construyeron celdas de dos cámaras soportadas sobre el electrolito (ánodo/electrolito/cátodo). Para ensayar los ánodos a base de NTO se utilizó una película de SDC de 0.03 cm de espesor como electrolito junto con un cátodo de Pt para construir la pila, y para evaluar el LNO como ánodo se empleó un electrolito de GDC de 0.04 cm de espesor combinado con cátodo comercial de $(La_{0.6}Sr_{0.40})_{0.95}Co_{0.20}Fe_{0.80}O_{3-x}$ (LSCF, Fuel Cell Materials). Se depositó a ambos lados una delgada capada de Au como colector de corriente. Las celdas se probaron en un sistema de prueba SOFC comercial (Probostat, Norecs).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación catalítica

Como puede observarse la en las figuras 1a y 1b se muestra la actividad de los catalizadores NTO, N-NTO y LNO. En todos los casos los valores de GHSV utilizados fueron elevados para evitar la desactivación por enmascaramiento y obtener valores iniciales de conversión inferiores al 100%.

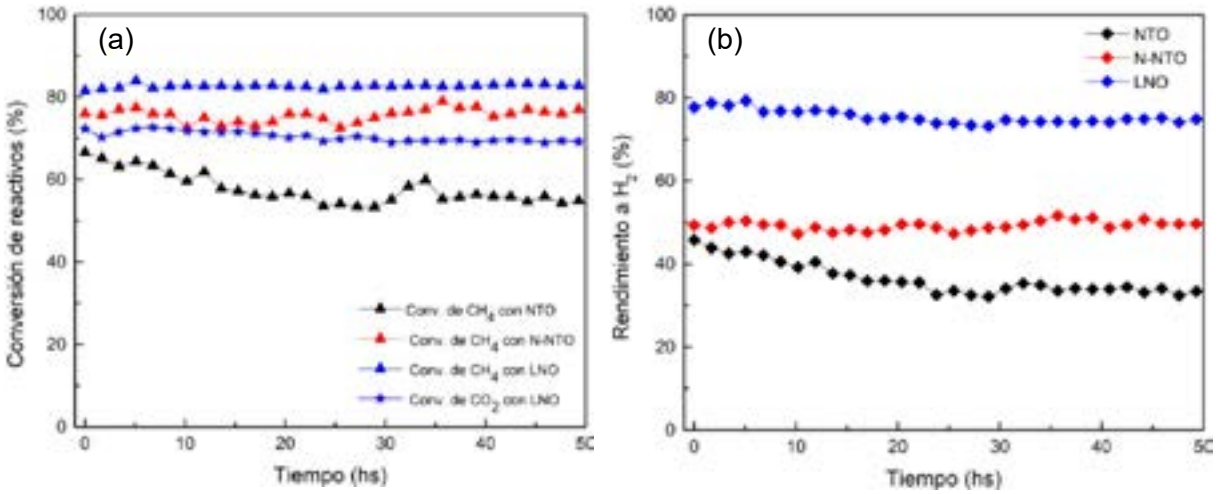


Figura 1. (a) Conversión de metano vs tiempo para los catalizadores basados en NTO en condiciones de oxidación parcial de metano, y (b) conversión de metano y CO_2 vs tiempo para el LNO en condiciones re reformado oxidativo de biogás.

Los resultados indican que luego de operar en condiciones de reacción durante 50 horas los catalizadores NTO presentan una pérdida de actividad menor al 20%. La muestra N-NTO muestra mayores valores de conversión en comparación con los de NTO, lo cual es razonable teniendo en cuenta la mayor carga metálica en el N-NTO. Además, la muestra N-NTO muestra un comportamiento muy estable en experimentos de tiempo en flujo con valores de conversión de metano (aprox. 77%) y de rendimiento a H_2 (aprox. 54%) prácticamente constantes en todo el rango de temperaturas evaluado. Estos resultados indican que la impregnación y la calcinación a 1000 °C mejoran el rendimiento del sólido a base de NTO, un comportamiento que es definitivamente beneficioso para las aplicaciones de SOFC.

En lo concerniente al LNO, los resultados muestran una estabilidad muy robusta durante 50 horas en condiciones de reformado oxidativo de biogás a 800°C, obteniendo valores de conversión de metano y CO_2 de aproximadamente 82 y 70%, respectivamente, acompañados por un rendimiento a H_2 del 75%.
En todos los casos la conversión de O_2 fue completa y el balance de carbono superior al 95%, indicando esto último la baja tendencia a la formación de depósitos de carbono en las condiciones ensayadas.

Caracterización electroquímica por EIS
Las muestras de NTO se ensayaron en configuración de celda simétrica en atmosfera de 7 mol% H_2/N_2, para estudiar la resistencia a la polarización (Rp) en función de la temperatura. En la figura 2a se muestra el espectro de impedancia recogido para este sólido a 750 °C, el cual arroja un valor de Rp de 0,03 Ωcm^2, el cual resulta muy inferior a los reportados para cermets Ni-YSZ tradicionales (Rp < 0,30 Ωcm^2 a 800 °C) [9].

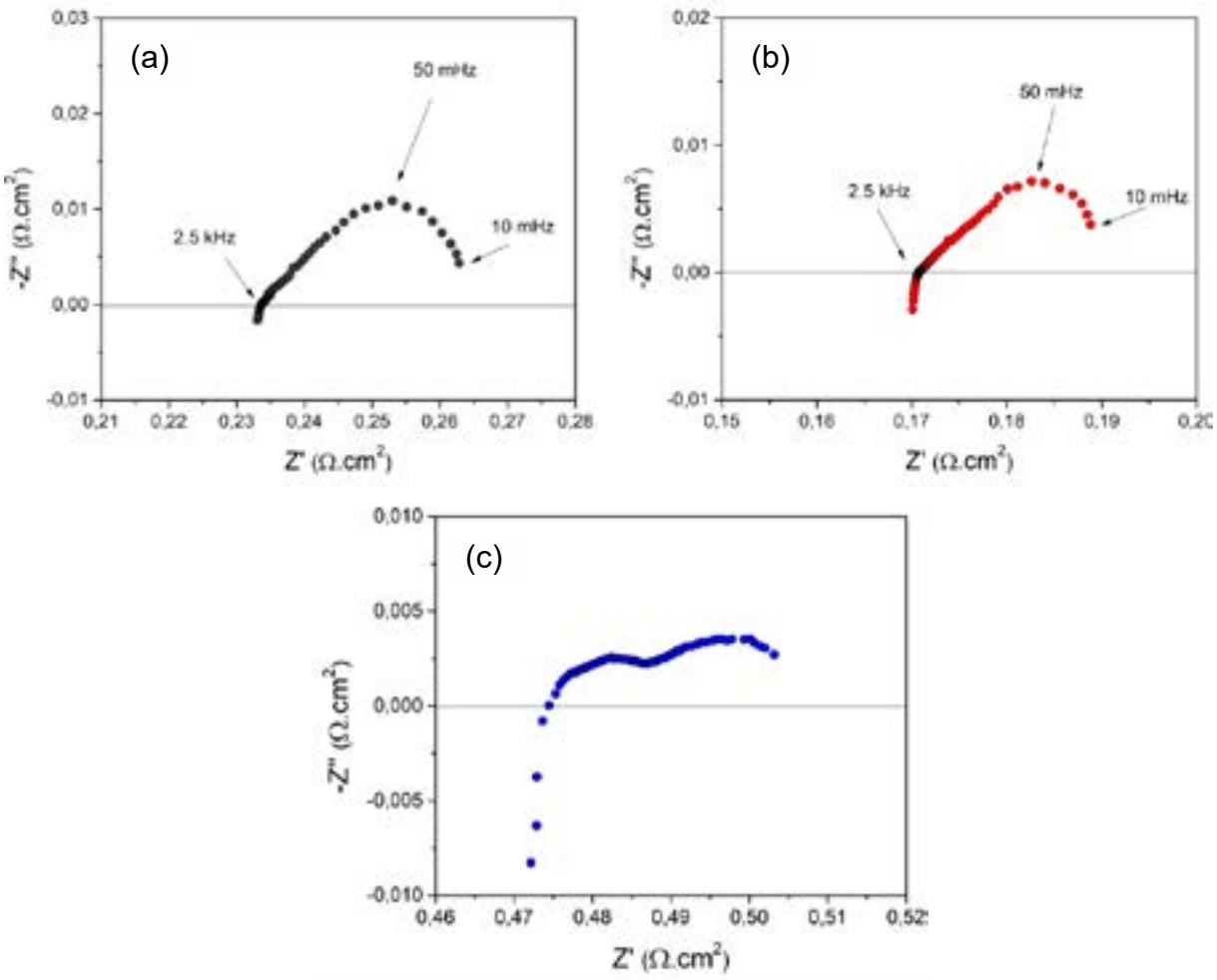


Figura 2. Diagramas de Nyquist adquiridos para las muestras (a) NTO y (b) N-NTO a 750 °C bajo atmósfera húmeda diluida de 7 mol% H_2/N_2, y para el (c) LNO adquirido a 800 °C bajo atmósfera húmeda de hidrogeno puro.

En la figura 2b se muestra observa el espectro de impedancia correspondiente al N-NTO recogido a 750 °C en 7 mol% H_2/N_2 en configuración de celda simétrica. La resistencia a la polarización en estas condiciones fue de 0,023 Ωcm^2, siendo este valor un 23% menor que en el caso de la muestra de NTO.

Se evaluó también la resistencia a la polarización (Rp) del LNO en configuración de celda simétrica a 800 °C (figura 2c). En un ambiente de H_2 puro, el material mostró un Rp de 0,03 Ωcm², lo que indica una excelente actividad electrocatalítica en estas condiciones.

Rendimiento electroquímico para las SOFC de dos cámaras

Para evaluar la performance electroquímica del NTO en una celda de dos cámaras, se ensambló la pila NTO/SDC//SDC//Pt, y se ensayó alimentando la misma con H_2 puro en la cámara anódica y aire en la cámara catódica a 750 °C. La densidad de potencia máxima obtenida fue de 8 $mWcm^{-2}$, notablemente baja teniendo en cuenta el rendimiento de los ánodos más modernos. Este bajo rendimiento podría deberse a la escasa percolación electrónica probablemente debido a la conexión insuficiente entre las pequeñas partículas metálicas de Ni presentes en la superficie del TiO_2 en atmosfera reductora [10].

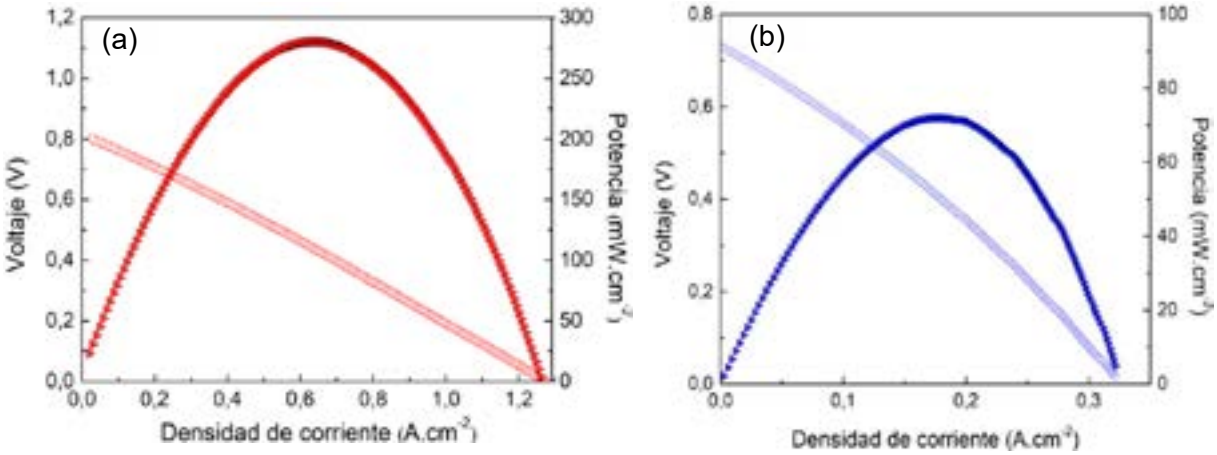


Figura 3. Curvas I (Densidad de corriente) vs V (Tensión) e I vs P (Densidad de potencia) de las pilas tipo botón (a) N-NTO/SDC//SDC//Pt y (b) LNO-GDC//GDC//LSCF-GDC, a 800°C.

Por otra parte, se determinó al rendimiento electroquímico del N-NTO (el NTO impregnado con 5% más de níquel) también con una pila de configuración tipo botón de N-NTO/SDC//SDC//Pt con flujo de H_2 puro en la cámara anódica y flujo de aire en la cámara catódica. A partir de los gráficos I-V-P mostrados en la figura 3a, se observa que a 800 °C obtuvo una densidad de potencia máxima de 280 $mWcm^{-2}$ con un OCV de 0,80 V, siendo este último valor inferior al potencial Nernst teórico, normalmente atribuido al cortocircuito de la celda debido a la conductividad eléctrica del electrolito SDC a 800 °C en un entorno reductor [11]. Los resultados indican una clara mejora del rendimiento de la celda debido al aumento de la carga metálica de la muestra.

Por último, se muestra en la figura 3b la curva I-V-P correspondiente a la pila LNO-GDC//GDC//LSCF-GDC con configuración de celda de dos cámaras utilizando H_2 como combustible. Para el ánodo de LNO en las condiciones mencionadas se obtuvo una densidad de potencia máxima de 72 $mWcm^{-2}$. Este resultado es prometedor si se considera que la celda se construyó empleando una capa de electrolito gruesa, de más de 400 µm de espesor (en comparación con la celda de SDC utilizada para ensayar el N-NTO), lo que introduce una contribución óhmica significativa. Probablemente, al reducir el espesor del electrolito esta resistencia sea menor, lo que permitiría alcanzar mayores densidades de potencia.

Conclusiones

Se prepararon dos materiales basados en titanato de níquel: el NTO y el 5N-NTO. Ambos mostraron buena estabilidad y actividad catalítica hacia la POM a 800°C, siendo superior la performance del sólido con mayor contenido metálico, lo que es esperable considerando que tiene mayor cantidad de sitios activos disponibles para el reformado de metano. Por otro lado, ambos materiales mostraron valores muy bajos de resistencia a la polarización en H_2 a 750°C, comparados con los valores mostrados por los ánodos tradicionales de Ni-YSZ. Sin embargo, al medir el rendimiento electroquímico en pilas SOFC de doble cámara construidas utilizando estos materiales como ánodos y alimentadas con H_2 y aire a 800°C, la densidad de potencia máxima entregada por el N-NTO fue muy superior a la mostrada por el NTO (280 vs 8 $mWcm^{-2}$, respectivamente).
En cuanto al LNO sintetizado, demostró ser catalíticamente activo y estable durante 50 horas hacia la reacción de reformado oxidativo de biogás llevada a cabo a 800°C. Respecto a la determinación de la resistencia a la polarización, también se obtuvo un valor muy bajo para este material en configuración de celda simétrica a 800 °C en atmosfera de H_2. El rendimiento electroquímico determinado a partir de una pila SOFC de doble cámara construida utilizando LNO+GDC como material anódico arrojó un valor de densidad de potencia máxima aceptable (72 $mWcm^{-2}$), que potencialmente podría superarse si se disminuye el espesor de electrolito en la celda.
Finalmente, cabe mencionar que los resultados mostrados posicionan al N-NTO y al LNO como candidatos atractivos para ser utilizados como ánodos en celdas SOFC, pero los mismo no permiten una comparación de sus desempeños en forma directa ya que estos materiales fueron evaluados en diferentes condiciones.

Referencias

[1] Ormerod RM. Solid oxide fuel cells. Chem Soc Rev 2003; 32:17-28.
[2] Du ZH, Zhao HL, Yi S, Xia Q, Gong Y, Zhang Y, Cheng X, Li Y, Gu L, Swierczek K. ACS Nano 2016; 10:8660-9.
[3] Wang W, Su C, Wu YZ, Ran R, Shao ZP. Chem Rev 2013; 113:8104-51.
[4] Connor PA, Yue X, Savaniu CD, Price R, Triantafyllou G, Cassidy M, Kerherve G, Payne DJ, Maher RC, Cohen LF, Tomov RI, Glowacki BA, Vasant Kumar R, Irvine TS. Adv Energy Mater 2018; 18:1800120.
[5] Alvarado Flores JJ, Avalos Rodríguez ML, Andrade Espinosa G, Alcaraz Vera JV. Int J Hydrogen Energy 2019; 44:12529-42.
[6] Shu L, Sunarso J, Salwa Hashim S, Mao J, Zhou W, Liang F. Int J Hydrogen Energy 2019; 44:31275-304.
[7] Yuvaraj S, Nithya V, Fathima K, Sanjeeviraja C, Selvan G, Arumugam S, Selvan R. Mater Res Bull 2013; 48:1110-6.
[8] Ribeiro JFS, Souza AA, Lima ECNL, Souza MJB, Garrido Pedrosa AM. Scientia Plena 2020; 16: 127202-12.
[9] An YT, Choi BH, Ji MJ, Hwang HJ. Solid State Ionics 2012; 207:64-8.
[10] Toscani LM, Volpe Giangiordano MF, Nichio N, Pompeo F, Larrondo S. Int J Hydrogen Energy 2020; 45: 43 23433-23443.
[11] Xi X, Cao ZS, Shen XQ, Lu Y, Li J, Luo JL, Fu XZ. J Power Sources 2020; 459:228071.

PRINCIPIO DE INCREMENTO DE LA ENTROPÍA: UN ENFOQUE ALTERNATIVO PARA SU APLICACIÓN EN LOS CURSOS DE GRADO DE TERMODINÁMICA

Taulamet María J.[1,2,*], **Mariani Néstor J.**[1,2], **Keegan, Sergio D.**[1]

[1]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina
[2]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA) CONICET- CIC – UNLP Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina
*e-mail: mariajose.taulamet@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: incremento de la entropía, segundo principio de la termodinámica, direccionalidad de los procesos.

1. Introducción

Resulta habitual que los alumnos en los cursos de grado de Termodinámica en las carreras de Ingeniería enfrenten dificultades para comprender el concepto de entropía en el contexto de la eficiencia de los procesos y en la determinación de la direccionalidad en la que pueden ocurrir en el universo. En general, puede afirmarse que los únicos procesos factibles son aquellos en los cuales el cambio en la entropía de un sistema aislado es mayor o igual a cero, este enunciado es conocido en los libros de texto (e.g. [1], [2]) como "principio de incremento de la entropía". Haciendo uso del hecho de que la entropía es una función de estado extensiva y dado que el universo *per se* resulta un sistema aislado, si se toma al universo como la suma del sistema más el ambiente se tiene que:

$$\Delta S_{universo}=\Delta S_{sistema}+\Delta S_{ambiente}$$

y se cumple que:

$$\Delta S_{aislado}=\Delta S_{universo} \quad \begin{cases} > 0 \text{ procesos irreversibles} \\ = 0 \text{ procesos reversibles} \\ < 0 \text{ procesos imposibles} \end{cases}$$

Resulta esencial que la metodología propuesta para la determinación del cambio de entropía del universo respete el principio de incremento de la entropía para todos los procesos que ocurren. Se demuestra a través de un ejemplo que la metodología propuesta en los libros de texto de uso extendido (*e.g.* [1], [2]) puede conducir a conclusiones erróneas y se propone una metodología alternativa.

2. Planteo de la problemática

Se hará el planteo del problema a partir de un ejemplo. Para esto se considera un sistema cerrado (n=0,025 kmol de un gas ideal) que sufre una compresión isotérmica desde condiciones iniciales de P_1=1 atm y T_{iso}=600 K hasta P_2=12 atm consumiendo un trabajo de 250 kJ y transfiriendo calor al medio ambiente que se encuentra a T_{amb}=300 K. En este contexto se calcula el cambio de entropía del universo, que se considera compuesto por los subsistemas cilindro-pistón, interfase y ambiente (Figura 1). En el presente trabajo las energías calor Q y trabajo W, se expresan en valores absolutos.

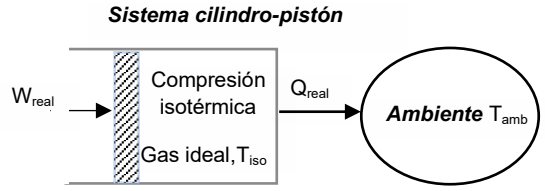


Figura 1: Representación del universo compuesto por los subsistemas cilindro-pistón, interfase y el ambiente

$$\Delta U = 0 \Rightarrow \quad |Q_{real}| = |W_{real}| = 250 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{sistema} = n \cdot \left(-R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) = -0.517 \text{ kJ/K}$$

$$Q_{amb} = |Q_{real}| = 250 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{amb} = \frac{Q_{amb}}{T_{amb}} = 0.833 \text{ kJ/K}$$

La metodología de cálculo del cambio de entropía propuesta en los libros de texto (e.g., [1], [2], entre otros), hace uso del hecho de que al ser esta una función extensiva, el cambio de entropía total resulta de la contribución de cada uno de los subsistemas, esto es:

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{amb} = -0.517 + 0.833 = 0.317 \text{ kJ/K}$$

Nótese que el cambio de entropía del universo resulta positivo.
Ahora, si la compresión isotérmica del gas ideal hubiese sido reversible se tendría:

$$\Delta U = 0 \Rightarrow \quad Q_{rev} = W_{rev} \qquad |W_{rev}| = \left| \int_{V_1}^{V_2} P dV \right| = \left| nRT \ln \frac{P_1}{P_2} \right| = 309.9 \text{ kJ}$$

el valor de W_{rev} obtenido resulta mayor que el W_{real}, esto claramente no puede ser, dado que la energía requerida por una compresión reversible siempre debe ser menor que la correspondiente a una compresión real, por ende, el proceso no es posible. Por esta razón deberíamos esperar que el cambio de entropía del universo sea negativo de acuerdo con el "*principio de incremento de la entropía*", sin embargo, resulta positivo.

3. Metodología de cálculo propuesta para el cambio de entropía del Universo

Sabido es que el cambio de entropía de un sistema cerrado y aislado sólo puede ser mayor o igual a cero, a la vez que el cambio de entropía del universo cuantifica la suma total de las irreversibilidades que surgen de la interacción de todos los subsistemas que lo componen.
La cuestión radica en la forma en la que se calcula el cambio de entropía de cada subsistema. La propuesta es que la misma se calcule, no de una forma aislada, sino de una forma integrada al universo, de manera tal de generar un sistema cerrado y aislado. Se reconoce como subsistemas al cilindro-pistón, a la interfase entre el cilindro-pistón y el ambiente y al ambiente propiamente. La metodología propuesta para el cálculo del cambio de entropía del universo consiste en computar el aporte que hace cada subsistema al incremento de entropía del universo, como se detalla a continuación.

3.1 Cambio de entropía del Universo debido únicamente al subsistema cilindro-pistón

Se considera entonces un universo ficticio, compuesto por el subsistema cilindro-pistón en contacto con el ambiente a través de un proceso reversible. Al ser este un sistema aislado el cambio de entropía de este universo ficticio solo puede ser mayor o igual a cero. En caso de ser mayor que cero, solo puede deberse al subsistema, ya que hemos considerado que el subsistema interactúa en forma completamente reversible con el ambiente que se asume libre de irreversibilidades.

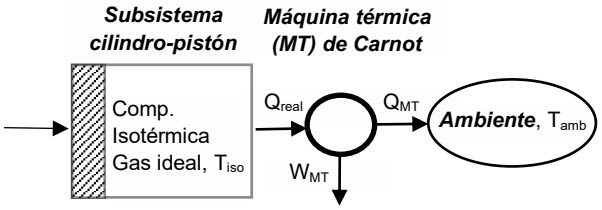


Figura 2: Representación del subsistema cilindro-pistón interactuando en forma reversible con el ambiente

De la Figura 2 el cambio de entropía del universo ficticio debido únicamente al subsistema cilindro-pistón, $\Delta S_{u,sub\ cil\text{-}piston}$, resulta:

$$\Delta S_{u,sub\ cil\text{-}piston} = \Delta S_{cil\text{-}piston} + \Delta S_{MT\ Carnot} + \Delta S_{amb}$$

$$\text{donde: } \Delta S_{cil\text{-}piston} = -\frac{Q_{rev}}{T_{iso}} \quad \text{y} \quad \Delta S_{amb} = \frac{Q_{MT}}{T_{amb}}$$

Considerando que el cambio de entropía de la máquina térmica ($\Delta S_{MT\ Carnot}$) es nulo, resulta:

$$\Delta S_{u,sub\ cil\text{-}piston} = -\frac{Q_{rev}}{T_{iso}} + \frac{Q_{MT}}{T_{amb}}$$

Para la máquina térmica de Carnot: $\frac{Q_{real}}{T_{iso}} = \frac{Q_{MT}}{T_{amb}}$

$$\Delta S_{u,sub\ cil\text{-}piston} = \frac{Q_{real}}{T_{iso}} - \frac{Q_{rev}}{T_{iso}} = \frac{250}{600} - \frac{309.9}{600} = -0.1\frac{kJ}{K}$$

En este punto, ya se puede afirmar a partir del principio de incremento de la entropía, que no es un proceso factible.

3.2 Cambio de entropía del universo debido solo a la interfase entre el cilindro-pistón y el ambiente

Se toma como subsistema la interfase existente entre el cilindro-pistón y el ambiente y se considera un universo ficticio, compuesto por el subsistema interfase en contacto con el ambiente a través de un proceso reversible. La interfase recibe calor por medio de una bomba de calor reversible (Figura 3).

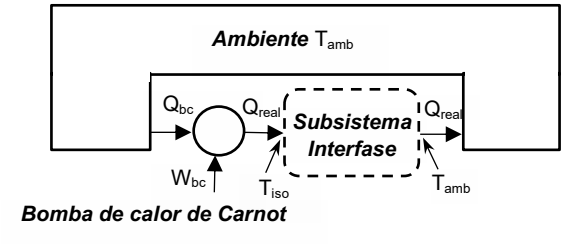


Figura 3: Representación del subsistema interfase cilindro-pistón y el ambiente recibiendo calor

$$\Delta S_{u,sub\ interfase} = \Delta S_{interfase} + \Delta S_{bc\ Carnot} + \Delta S_{amb}$$

Considerando que el cambio de entropía de la bomba de calor y de la interfase propiamente son nulos se tiene que el cambio de entropía del universo ficticio debido solo al subsistema interfase ($\Delta S_{u,sub\ interfase}$) se calcula como:

$$\Delta S_{u,sub\ interfase} = \Delta S_{amb} = -\frac{Q_{bc}}{T_{amb}} + \frac{Q_{real}}{T_{amb}}$$

De la bomba de calor se tiene que: $\frac{Q_{real}}{T_{iso}} = \frac{Q_{bc}}{T_{amb}}$

$$\Delta S_{u,sub\ interfase} = \frac{Q_{real}}{T_{amb}}\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{iso}}\right) = \frac{250}{300}\left(1 - \frac{300}{600}\right) = 0.417\,\frac{kJ}{K}$$

El cambio total de la entropía del universo se computa como la suma del aporte que cada subsistema hace al universo. El subsistema cilindro-pistón por un lado, el de la interfase por otro y el ambiente por otro, que como se adelantó se considera libre de irreversibilidades por lo que su aporte a la entropía del universo es siempre cero.

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{u,sub\ cilindro\text{-}pistón} + \Delta S_{u,sub\ interfase} = -0.1 + 0.417 = 0.317\,\frac{kJ}{K}$$

4. Discusión y conclusiones

Al observar los resultados obtenidos en el ejemplo se concluye que tanto la metodología planteada en los libros de texto de uso extendido como la propuesta en este trabajo permiten computar apropiadamente la variación de la entropía del universo, la cual resulta positiva. La diferencia radica en que la forma propuesta en este trabajo permite, adicionalmente, discernir si los procesos involucrados en cada uno de los subsistemas resultan o no viables en base al principio de incremento de la entropía.

El problema de la metodología más extendida aparece dado que se plantea el cómputo del cambio de entropía de cada subsistema en forma aislada y luego su suma para obtener el cambio de entropía del universo. De esta manera, y como se muestra en el ejemplo propuesto, al ser el cambio de entropía de la interfase mucho mayor en términos absolutos que el del cilindro-pistón, se enmascara el hecho que uno de los procesos (*i.e.*, la compresión) no es viable.

Cabe aclarar que posiblemente, en una parte importante de los casos que se presentan en la práctica la metodología más extendida posibilite obtener conclusiones correctas. No obstante, ejemplos como el planteado no pueden descartarse, razón por la cual resulta más apropiada la metodología aquí propuesta.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 2005) y UNLP (PID I270). MJT y NJM son investigadores del CONICET.

6. Bibliografía

[1] Moran M. J., Howard N., Shapiro H. N., Boettner D. D., Margaret M. B. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 9th ed. John Wiley & Sons, Inc. (2018).

[2] Cengel Y. A., Boles M. A., Kanoglu M. Thermodynamics: An Engineering Approach, 9th ed., McGraw-Hill Education (2018).

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DIFUSIÓN-REACCIÓN EN ESTRUCTURAS CATALÍTICAS GENERADAS A PARTIR DE IMPRESIÓN 3D

Taulamet María J.[1,2,*], **García Colli Germán**[1], **Keegan Sergio D.**[1], **Mariani Néstor J.**[1,2]

[1]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina
[2]Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA) CONICET- CIC – UNLP Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina
*e-mail: mariajose.taulamet@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: impresión 3D, velocidad de reacción efectiva, reacción-difusión, modelos 1D

1. Introducción

La utilización de la tecnología de impresión 3D se ha incrementado notablemente en los últimos años en diversas áreas, en particular, en el campo de los reactores catalíticos. Se dispone de distintos procedimientos para generar las estructuras 3D que actúan como reactores [1] lo que, sumado a la posibilidad de emplear diferentes tipos de materiales en la impresión, ha ampliado el campo de aplicación de esta tecnología. Si bien existe una gran variedad de procesos estudiados con reactores catalíticos conformados a partir de impresión 3D, resultan de particular interés los de liberación de H_2, usado como vector energético, a partir de sustancias empleadas para su transporte, como NH_3 [2] o los denominados LOHC, *liquid organic hydrogen carriers* [3].
Disponiendo del catalizador para un proceso específico, el aporte de la impresión 3D está direccionado a generar estructuras que permitan minimizar, sino eliminar, los procesos de transporte de masa y energía que puedan resultar en un detrimento de la actividad y selectividad intrínseca que tiene el material catalítico. Al mismo tiempo la posibilidad de modelar "ad hoc" dichas estructuras permite minimizar también la pérdida de presión. Disponer de herramientas que permitan evaluar el impacto de los procesos de transporte en las estructuras catalíticas factibles de ser generadas a partir de impresión 3D constituye un requisito esencial a los efectos de diseñar, a través de la simulación, la estructura más adecuada para un dado proceso y plasmarla a través de la impresión. En particular, restringiendo la evaluación al proceso de reacción-difusión en un medio poroso, se debe explorar la capacidad predictiva para el caso de estructuras que, tomando un plano perpendicular a la dirección de flujo en el reactor, constituyen un sistema 2D.
El objetivo de esta contribución es evaluar el proceso de difusión-reacción en sistemas 2D, correspondientes a distintas estructuras generadas a partir de impresión 3D. Se analizaron distintas expresiones cinéticas, tomando como base la información presentada por Lucentini [2] para la descomposición de NH_3. Los resultados alcanzados mediante la resolución numérica permiten identificar el impacto sobre el factor de efectividad de las diferentes estructuras de acuerdo con la zona de trabajo (variación del módulo de Thiele) y la expresión cinética utilizada. Asimismo, se analizaron alternativas 1D que permiten estimar el factor de efectividad de una forma simplificada, conservando un buen nivel de precisión en los sistemas estudiados.

2. Características geométricas de las estructuras catalíticas impresas en 3D

La impresión 3D permite alcanzar una gran diversidad de estructuras catalíticas [3] lo que hace muy atractiva su implementación. Existen dos formas diferentes de disponer el material catalítico en estas estructuras. Una alternativa consiste en depositar el material catalítico en una fina capa en la superficie exterior de la estructura, en contacto con la corriente de fluido. Este caso, salvando la diferencia con la geometría de cada situación, es comparable a la de una partícula convencional con impregnación *egg-shell* o al depósito que se realiza en la

mayor parte de estructuras monolíticas. La resolución de las ecuaciones de difusión-reacción y propuestas de aproximación con modelos 1D, para estructuras monolíticas con una fina capa de material catalítico depositado en el interior de sus canales ha sido analizada en trabajos recientes para monolitos cerámicos [4] y metálicos [5]. Es esperable que las propuestas y resultados alcanzados en dichos trabajos se puedan extender a las estructuras de impresión 3D en las cuales el material catalítico se deposita en una fina capa en la superficie exterior. Una segunda alternativa consiste en depositar el material catalítico en toda la estructura generada lo que, haciendo la analogía con una partícula convencional, representa una "impregnación uniforme". Si bien esta situación ha sido estudiada para partículas individuales de catalizador con una extensa variedad de formas geométricas [6], el caso de la impresión 3D se diferencia claramente porque, aunque exista una impregnación uniforme, el reactor en su conjunto se asemeja a un monolito pero que funciona como un catalizador másico. Teniendo en cuenta esta situación se analizarán cuatro estructuras generadas con impresión 3D que presentan estas características. Las mismas han sido presentadas en la Tesis Doctoral de Lucentini [2]. En la Tabla 1 se muestran los cortes perpendiculares al eje axial de las mismas junto a sus parámetros representativos.

Los canales son (aproximadamente por la forma de fabricación) de sección cuadrada. La corriente reactiva circula por el interior de los mismos suministrando el reactivo a la zona catalítica. El conjunto del monolito tiene sección circular y no existe suministro de reactivos por su envolvente, la cual se emplea para llevar a cabo la transferencia de energía necesaria para mantener la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción.

Tabla 1: Estructuras catalíticas analizadas y sus principales características

Denominación	**S_0**	**S_1**	**S_2**	**S_3**
Sección transversal				
Número de canales	36	52	52	24
Dimensión de cada canal [mm]	0.96	1.1	0.74	1.05
Espesor de pared (entre canales) [mm]	0.61	0.4	0.49	0.45

3. Modelado matemático y resolución numérica

Las estructuras catalíticas impresas en 3D constituyen un microreactor y se debe involucrar su dimensión axial si se requiere calcular la conversión de un reactivo, pero a los efectos del análisis del problema de difusión-reacción es suficiente tomar un plano perpendicular a este eje llevándolo a un sistema 2D. Estos planos determinan las secciones transversales que se visualizan en la Tabla 1. Teniendo en cuenta la simetría en las estructuras es suficiente simular sólo 1/8 de las mismas a efectos minimizar el costo temporal de la resolución numérica. En el planteo que se desarrollará a continuación se mantendrá el caso general tridimensional (3D), donde S_P es la superficie interna de los canales por donde accede el reactivo y V_P es el volumen total de la estructura 3D ($V_P=S_P\,L$, donde L es la longitud axial de dicha estructura).

Asumiendo que no hay una dirección preferencial de difusión en el medio poroso, la ecuación de difusión-reacción resulta:

$$\nabla.D\nabla Y = \phi^2\, r(Y)\,, \qquad \text{en } V_P; \qquad (1)$$

Las coordenadas espaciales han sido adimensionalizadas con la longitud característica $\ell = V_P/S_P$, $Y=C_A/C_{As}$ es la concentración adimensional del reactivo limitante A, $r = r_A/r_{As}$ es la velocidad de consumo adimensional del reactivo limitante A y $D=D_A/D_{As}$ es la difusividad efectiva adimensional del reactivo limitante A, donde el subíndice "s" indica el valor uniforme sobre la superficie del canal.

Delimitado 1/8 de cada una de las secciones transversales de la Tabla 1, las condiciones de borde son de flujo de materia nulo en los bordes de la sección en estudio, por la simetría

existente; flujo de materia nulo en la envolvente (estrictamente el sector de circunferencia correspondiente), porque se ha mencionado que se emplea para la regulación de temperatura y está aislada para la transferencia de materia y concentración de reactivo uniforme y definida en el borde de cada canal asumiendo que no hay resistencia a la transferencia de materia en cada canal.
Se definen el módulo de Thiele (ϕ) y el factor de efectividad (η, velocidad de reacción promedio adimensional), respectivamente, como:

$$\phi^2 = {}^{\prime 2} r_{As}/[D_{As} C_{As}] \quad ; \quad \eta = \frac{1}{V_P}\int_{V_P} r \, dV_P \qquad (2a, b)$$

El sistema se asume isotérmico. Se han realizado simulaciones incorporando el balance de energía y, aunque la capacidad de conducción de calor de las diferentes estructuras no es idéntica debido a la diferencia de porosidad, se ha verificado que no existen gradientes de temperatura significativos en ningún punto.
A fin de resolver la ecuación de difusión-reacción y así evaluar el factor de efectividad se utilizó el programa COMSOL Multiphysics®.

4. Sistemas reactivos analizados

Para la simulación se ha tomado como referencia el conjunto de condiciones estudiadas por Lucentini [2] para la descomposición de NH_3 con el fin de obtener H_2. Esta es una reacción endotérmica que se opera entre 350 y 550 °C. En el estudio se analizaron diferentes niveles de temperatura; si bien hay diferencias cuantitativas, no son relevantes para el objetivo del estudio, por lo que aquí se presentan sólo los resultados alcanzados para 350 °C, que resulta el caso más exigente. Para la simulación se considera que se alimenta NH_3 puro (este es el reactivo limitante A), que es la condición del seno del fluido, ya que se asume que las estructuras visualizadas en la Tabla 1 corresponden al corte axial en la entrada al reactor. Si bien en la Tesis de Lucentini [2] se presenta una expresión completa de la velocidad de reacción, a efectos de realizar un análisis más extendido se incluyeron otras dos expresiones cinéticas. Una de primer orden, que es un punto de referencia para este tipo de estudios y una expresión cinética del tipo LHHW con fuertes efectos de autoinhibición. En síntesis, se consideraron las siguientes expresiones:

Expresión completa:	$r = 108\ Y / [1 + 9.4\ Y + 5\ (1\text{-}Y)^{0.5}]^2$	(3a)
Primer orden irreversible isotérmica:	$r = Y$	(3b)
LHHW (Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson):	$r = 108\ Y / (1 + 9.4\ Y)^2$	(3c)

A efectos de ampliar el estudio, se varió ϕ arbitrariamente, en un rango muy amplio.

5. Resultados y Discusión

Los resultados alcanzados se discutirán en dos puntos diferenciados. En primer lugar, los resultados derivados estrictamente de la resolución numérica y posteriormente la capacidad de evaluar las velocidades de reacción efectivas con modelos 1D.

5.1. Análisis de resultados de la simulación numérica

Al comparar el factor de efectividad de cada una de las estructuras presentadas en la Tabla 1 para una reacción de primer orden se verifica, como era de esperarse, que a bajos valores de ϕ, el factor de efectividad siempre tiende a uno y, para altos valores del mismo, a un valor asintótico, coincidente para las cuatro estructuras. El impacto del tipo de estructura se aprecia a valores intermedios de ϕ, aproximadamente entre 0.5 y 5, donde $\eta_{S1} > \eta_{S0} > \eta_{S2} > \eta_{S3}$. La estructura S_1 es la más “abierta”, con mayor porosidad y menor espesor de las paredes entre canales, todos estos aspectos conducen a que sea la que presenta mayor eficiencia. El caso opuesto es el de la estructura S_3, que tiene la menor porosidad y una zona en la corona externa de un espesor apreciable (en términos relativos), generando mayores longitudes en el proceso de difusión del reactivo y, por lo tanto, conduciendo a la menor eficiencia. El diseño final de la estructura más eficiente debe contemplar, adicionalmente, otros aspectos como pérdida de carga, impacto en la transferencia de calor,

incidencia en la transferencia de materia entre el seno del fluido y la pared de cada canal y la resistencia mecánica de la propia estructura. No obstante, es claro que las estructuras más "abiertas" presentan ventajas en dos de estos aspectos que son la eficiencia en el proceso de difusión-reacción y la pérdida de carga.

Los resultados alcanzados con la cinética denominada "completa" son totalmente análogos a los de la de primer orden. En el transporte en el medio poroso se produce una disminución del reactivo y un aumento de los productos, que incide en el denominador de la expresión cinética, lo que conduce a prácticamente un pseudoprimer orden y un comportamiento general, en cuanto al impacto de cada estructura, análogo al discutido previamente.

La variación del factor de efectividad en función de ϕ para la cinética de tipo LHHW se muestra para las cuatro estructuras en la Figura 1. Está reportado en la bibliografía que este tipo de expresiones cinéticas pueden tener comportamientos anómalos incluso en sistemas 1D ya que pueden presentar puntualmente un orden negativo y, por lo tanto, al agotarse el reactivo aumenta la velocidad de reacción, generando máximos locales (picos) en el factor de efectividad que pueden tomar valores incluso mayores a uno.

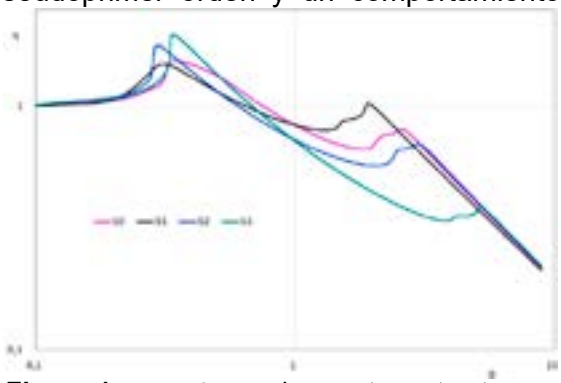


Figura 1: η vs. ϕ para las cuatro estructuras analizadas y una expresión cinética de tipo LHHW.

El comportamiento presentado en la Figura 1 es muy particular, ya que se aprecian dos picos en la curva de η, aunque no necesariamente ambos toman valores mayores a uno. También aparece un hombro intermedio. Para comprender físicamente estas curvas se emplearán los perfiles de concentración del reactivo dentro de la estructura S_1 para tres valores de ϕ, que se corresponden con el primer pico, el hombro y el segundo pico.

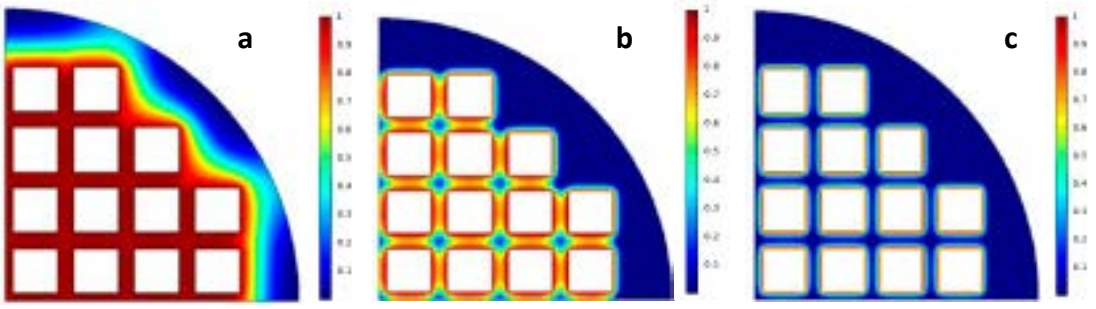


Figura 2: Perfiles de concentración del reactivo dentro de la estructura S_1 para una expresión cinética de tipo LHHW. a) ϕ=0.31; b) ϕ=1.5 ; c) ϕ=1.93

En la Figura 2a se aprecia un agotamiento del reactivo en la zona exterior de la estructura catalítica, que provoca, dadas las características de la cinética, un aumento de la velocidad de reacción en dicha zona conduciendo al primer pico en la curva η vs ϕ. Sin embargo, en los tabiques entre canales la concentración de reactivo se mantiene elevada, cercana a la máxima. En la figura 2b (ϕ mayor) la zona externa pierde su incidencia por el agotamiento prácticamente total del reactivo, pero se aprecia una disminución de la concentración en la zona de intersección entre los tabiques, dando lugar al hombro. Un aumento ulterior de ϕ lleva a una disminución de la concentración en los propios tabiques entre canales, generando la aparición del segundo pico. Un aumento ulterior de ϕ (no incluido en la Figura 2) conduce a la zona asintótica del factor de efectividad. Claramente, este tipo de estructura catalítica generada por impresión 3D es la que conduce al comportamiento observado, lo que no se verifica en sistemas del tipo 1D (por ejemplo, en partículas esféricas) para la misma cinética.

El comportamiento del factor de efectividad para las otras estructuras tiene la misma explicación física, aunque el valor de los picos y su ubicación es específico de cada

estructura. En estos casos no resulta evidente la selección de una estructura sobre otra basada en la efectividad, ya que modificaciones operativas o incluso el propio avance de la reacción, pueden modificar dicha selección. Una conclusión análoga fue alcanzada por Beckert y Wei [7] al estudiar diferentes formas de impregnación en partículas catalíticas para reacciones que presentan cinéticas con fuertes efectos de inhibición, aunque en dicho caso sólo se detectó un único pico del factor de efectividad para cada estructura.

5.2. Análisis de resultados de aproximaciones con modelos 1D

Cuando se debe simular el comportamiento de un reactor, la evaluación del factor de efectividad se debe reiterar en cada punto axial, por lo que, si estas evaluaciones se realizan en forma numérica sobre la sección transversal 2D, requieren un esfuerzo computacional apreciable. Por esta razón la búsqueda de aproximaciones con modelos 1D se torna de gran interés [4,5,6,8]. Para evaluar la capacidad predictiva de tales aproximaciones se calculará el error relativo como:

$$\varepsilon = 100*(\eta_{1D}-\eta) / \eta \qquad (4)$$

donde el subíndice 1D identifica al modelo unidimensional.
Variando ϕ en un amplio rango es factible detectar en qué zona se presentan los mayores errores y obtener su máximo. Aunque las cuatro estructuras presentan diferencias, el abordaje de las aproximaciones es el mismo para todas. La magnitud de los errores de las aproximaciones y la ubicación de los mismos al variar ϕ son específicos de cada estructura, por ello se discutirán los resultados en conjunto puntualizando, cuando corresponda, alguna particularidad de cada una.
La evaluación del factor de efectividad con expresiones 1D básicas, como la de una placa plana, resulta totalmente insatisfactoria, incluso para la expresión cinética más simple (primer orden) con errores máximos que llegan al 73% para la estructura S_3. El empleo de modelos 1D desarrollados previamente [8] tampoco permitió alcanzar resultados satisfactorios al aplicarlos a la geometría completa, debido a que no se lograron obtener parámetros adecuados para aplicar dichos modelos.

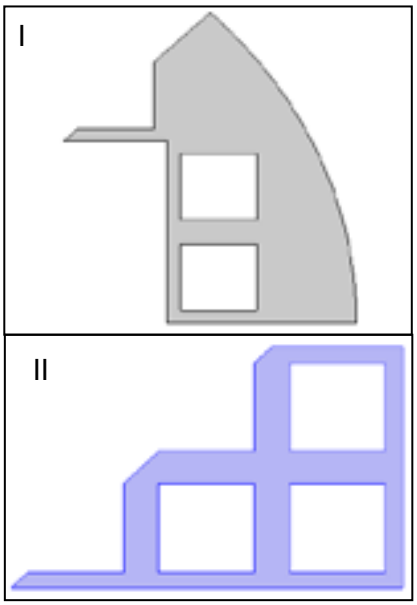


Figura 3: Esquema de los sectores I y II para la estructura S_1.

Ante esta dificultad y, dada la complejidad que presentan las geometrías analizadas, se orientó la búsqueda de aproximaciones a un enfoque análogo al empleado por Taulamet y col. [4] para aproximar la evaluación de la velocidad de reacción efectiva en monolitos, consistente en dividir la superficie 2D en dos sectores y en cada uno de ellos aplicar modelos 1D. Por una parte, se toman los canales ubicados en el borde externo de la estructura (Sector I) y por el otro los canales del centro (Sector II). En la Figura 3 se muestra, como ejemplo, la partición realizada para la estructura S_1.
Se impuso como condición de borde flujo nulo entre ambos sectores, lo cual fue chequeado adecuadamente. Para aproximar el Sector I se utilizó el modelo de difusividad variable (1DDV), mientras que para el Sector II se aplicaron dos alternativas, una aproximación como placa plana y otra empleando el modelo 1DDV. La aplicación del modelo 1DDV requiere obtener sus respectivos parámetros para cada geometría (estructura y sector) y expresión cinética estudiada. Detalles adicionales de cómo emplear este modelo que divide la superficie en dos sectores se pueden consultar en [4].
Los mejores resultados se alcanzaron empleando el modelo 1DDV para ambos sectores. En la Tabla 2 se muestra el valor absoluto de los errores máximos alcanzados en la evaluación del factor de efectividad y el valor de ϕ al cual se produce dicho error.
Previsiblemente la cinética más sencilla (*i.e.*, la de primer orden), permite alcanzar una estimación aceptable del factor de efectividad para todas las estructuras, con errores

máximos entre 3.9 y 7.3 %. Para la cinética de tipo LHHW, como se discutió previamente, la variación del factor de efectividad es muy compleja, con la presencia de dos picos y un hombro. La división en dos sectores permite capturar la presencia de los dos picos y ubicar, razonablemente, los mismos. En cambio, el hombro que aparece antes del segundo pico no es capturado por las aproximaciones. No obstante, y dado que la magnitud de estos hombros no es muy significativa, los errores máximos resultan relativamente acotados con valores que se encuentran entre 13.5 y 18.2 %, dependiendo de la estructura analizada.

Tabla 2: Valor absoluto del máximo error (y ubicación del mismo) en la evaluación del factor de efectividad empleando el modelo 1DDV para cada sector de la estructura.

Estructura	Cinética de primer orden	Cinética tipo LHHW
S_0	7.3 (ϕ=4)	16.5 (ϕ=2.7)
S_1	3.9 (ϕ=2.8)	13.5 (ϕ=2)
S_2	5.8 (ϕ=4)	18.2 (ϕ=2.4)
S_3	6.3 (ϕ=7)	14.7 (ϕ=5.5)

Los resultados alcanzados con el modelo 1D-DV muestran que dicha herramienta puede considerarse satisfactoria para cinéticas sencillas y una primera aproximación razonable en la búsqueda de las estructuras más eficientes para cinéticas más complejas.

6. Conclusiones

Se ha estudiado el fenómeno de difusión-reacción en diferentes estructuras catalíticas generadas a partir de impresión 3D para distintas expresiones cinéticas. Se llevó a cabo la resolución numérica de un corte axial de la estructura, lo que lo transforma el sistema 3D en uno 2D. Para la cinética más sencilla de primer orden la variación del factor de efectividad con el módulo de Thiele tiene un comportamiento cualitativo análogo al observado para el caso de una partícula, pero con diferencias cuantitativas, las cuales a su vez permiten orientar a la elección de las estructuras más convenientes. Para cinéticas del tipo LHHW con fuerte incidencia de la adsorción de reactivo se verifica un comportamiento muy particular del factor de efectividad, con la presencia de dos picos y un hombro que no se detectan habitualmente en partículas convencionales.

Por otra parte, se analizaron distintas alternativas para aproximar la evaluación del factor de efectividad con modelos 1D. La mejor resultó la derivada de dividir en dos sectores el sistema 2D y aplicar en cada uno un modelo 1D (*i.e.*, el modelo de difusividad variable -1DDV- con parámetros propios de cada sector). La comparación con los resultados numéricos resultó muy adecuada para la expresión cinética de primer orden (errores máximos inferiores al 7.3%), y satisfactoria para la cinética anormal estudiada, con errores máximos entre 13.5 y 18.2 %, dependiendo de la estructura analizada.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 2005) y UNLP (PID I270). MJT y NJM son investigadores del CONICET.

8. Referencias

[1] Mastroianni, L., A. Medina Ferrer, A. De Domenico, K. Eränen, M. Di Serio, D. Murzin, V. Russo, T. Salmi, Chem. Eng. J., 201 (2024) 157691.
[2] Lucentini, I., Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2021).
[3] Großmann, P.F., Tesis Doctoral, Technische Universitat München (2023).
[4] Taulamet, M.J., N.J.Mariani, O.M.Martinez, G.F.Barreto, Catal. Today, 372 (2021) 226-237.
[5] Taulamet, M.J., O.M.Martinez, G.F.Barreto, N.J.Mariani, Chem. Eng. Proc. – Process Intens., 181 (2022) 109144.
[6] Mariani, N.J.,J.M.Taulamet, S.D.Keegan, O.M.Martinez, G.F.Barreto, Ind. Eng. Chem. Res., 52 (2013) 15321-15329.
[7] Beckert, E.R., J. Wei, J. of Catalysis, 46 (1977) 365-371.
[8] Taulamet, M.J, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata (2015).

PRODUCCIÓN DE PHA EN REACTOR BATCH CON BIOGRÁNULOS AERÓBICOS UTILIZANDO FENOL BAJO CONDICIONES LIMITADAS DE CRECIMIENTO

Berretta Invernizzi, Georgina,[1,2], Ferro Orozco, Micaela[3], Zaritzky, Noemí[1,2], Caravelli, Alejandro.[1]

1 Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos (CIDCA). Calle 47 esquina 116, La Plata, 1900, Argentina.
2 Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP
3 Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA). Av. Colón 10850, Mar del Plata, 7606, Argentina
georginab90@gmail.com

Palabras clave: Reactor batch, polihidroxialcanoatos, fenol, biogránulos aeróbicos

Introducción

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son polímeros intracelulares biodegradables que representan una alternativa sustentable para reemplazar los plásticos convencionales de origen petroquímico (Yang, 2022). Su producción mediante cultivos microbianos mixtos y el aprovechamiento de efluentes industriales, como fuente de carbono renovable, constituye una estrategia prometedora para reducir costos y valorizar residuos (Moita, 2014). Para ello se requiere comúnmente una etapa de selección de microorganismos con capacidad de producción de PHA en un reactor batch secuencial (SBR) seguido de una etapa de producción en reactor batch o batch alimentado limitado en algún factor de crecimiento (nitrógeno u oxígeno típicamente).

Diferentes condiciones pueden afectar la producción de PHA. Estudios previos realizados con cultivos mixtos de lodos activados alimentados con glicerol han demostrado que elevadas relaciones alimento/microorganismo (F/M, food-to-microorganism) favorecen la síntesis de PHA, como principal polímero de reserva, en detrimento de glucógeno (Moralejo-Gárate et al., 2013). En el caso del fenol como fuente de carbono se ha observado que altas cargas orgánicas y relaciones F/M permiten generar un alto contenido de PHA en la biomasa, aunque el fenol puede ejercer un efecto inhibitorio al reducir las tasas de crecimiento microbiano y producción de PHA (Zhang et al., 2018). Sin embargo, el desarrollo de lodos granulares aeróbicos (AGS) podría mitigar este efecto inhibitorio, permitiendo una producción eficiente de PHA incluso con altas cargas de fenol. Debe tenerse en cuenta que la limitación de nutrientes u oxígeno desvía el metabolismo microbiano hacia la generación de reservas intracelulares. Los microorganismos reducen su actividad metabólica y priorizan el almacenamiento de carbono en forma de polímero (PHA y/o glucógeno) como mecanismo de supervivencia, en lugar de utilizarlo para el crecimiento celular (Zhang et al., 2018).

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) cultivar biogránulos aeróbicos en un SBR tipo columna utilizando un efluente sintético conteniendo fenol como única fuente de carbono y energía. 2) operar el SBR bajo condiciones alternantes de disponibilidad de carbono e inanición (régimen "*feast/famine*") para favorecer la selección de microorganismos con capacidad de acumulación de reservas intracelulares de carbono (PHA y glucógeno). 3) utilizar la biomasa granular obtenida en reactores batch de producción de PHA con altas cargas de fenol. 4) evaluar el consumo del sustrato orgánico y la acumulación de PHA bajo diferentes condiciones: a- limitación en nitrógeno (LN), b- limitación en nitrógeno y oxígeno (LNO-1 y LNO-2).

Materiales y métodos

Cultivo de biogránulos en SBR

Se utilizó un reactor batch secuencial (SBR) para el cultivo de biogránulos aeróbicos. El reactor fue operado con una velocidad de aire superficial ascendente de 0.9 cm s^{-1}, seleccionada en base a estudios previos (Devlin et al., 2017). El SBR fue diseñado con una relación altura/diámetro (A/D) de 9.2 y un volumen de trabajo de 4.6 L, equipado con aireadores en la parte inferior para proporcionar aireación y mezcla.

El reactor se operó bajo régimen "*feast*/*famine*" con ciclos de 24 horas, que incluyeron fases de alimentación, reacción aeróbica, purga de biomasa, sedimentación y extracción del sobrenadante. El tiempo de residencia celular (TRC) se mantuvo en 10 días y el tiempo de residencia hidráulica (TRH) fue de 2.8 días, con un intercambio volumétrico del 50%. El SBR se operó en condiciones de estabilidad con una carga diaria de 750 mg fenol.L^{-1} como única fuente de carbono en un efluente sintético que contenía además sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) como fuente de nitrógeno, sales de fosfato (KH_2PO_4 y K_2HPO_4) como fuente de fósforo, y una solución de micronutrientes (Bucci et al., 2021). La relación DQO:N:P se mantuvo constante en 100:5:2.

Ensayos batch

Los cultivos fueron alimentados con un efluente sintético conteniendo fenol, sales de fosfato (KH_2PO_4 y K_2HPO_4) y una solución de micronutrientes. Las condiciones operativas se detallan en la Tabla 1. Los ensayos batch se llevaron a cabo por duplicado en reactores de 6 L con un agitador magnético para garantizar una mezcla homogénea. Para mantener condiciones aeróbicas se colocaron aireadores en el fondo del reactor, los cuales proporcionaron una aireación constante durante todo el ensayo. La temperatura se mantuvo estable a 30°C.

Tabla 1: Condiciones de operación de los cultivos de producción: Limitado en nitrógeno (LN) y en nitrógeno y oxígeno (LNO-1 y LNO-2).

Condición	Fenol Inicial (mg.L^{-1})	Biomasa Inicial (gST.L^{-1})	F/M Inicial (cmmol fenol.cmmol X^{-1})
LN	2500	1.4	3.03
LNO-1	2500	1.6	2.60
LNO-2	2700	1.2	3.65

Métodos analíticos

Determinación de sustrato orgánico y biomasa

La concentración de sustrato orgánico se determinó mediante la demanda química de oxígeno (DQO). Adicionalmente el consumo de compuestos fenólicos se monitoreó utilizando el método colorimétrico de 4-aminoantipirina (Jones et al., 1973). Las muestras se centrifugaron y filtraron (0.45 µm) antes del análisis. La biomasa se cuantificó como sólidos totales (ST, g.L^{-1}). Las muestras se recolectaron del reactor, se centrifugaron, lavaron con agua destilada y se secaron a 105°C durante 24 horas o hasta alcanzar un peso constante.

Análisis de carbohidratos totales (CT) y polihidroxialcanoatos (PHA)

Los carbohidratos totales (CT) se midieron utilizando la técnica de Antrona (Raunkjær et al.,1994), que permite cuantificar la fracción de glucógeno en la biomasa. Las muestras se sometieron a sonicación (Sonic Ruptor 400, Omni International, Inc, EE.UU.) al 40% de potencia durante 1 minuto para homogenizar la biomasa antes del análisis. La determinación de PHA intracelular siguió el protocolo desarrollado por Bucci (2021). Las muestras se sometieron a extracción con cloroformo y la concentración y pureza del PHA se determinó mediante espectrofotometría UV a 235 nm (Reddy et al., 2012).

Parámetros cinéticos y rendimientos

Las velocidades volumétricas de consumo de sustrato orgánico (rDQO, $mgO_2.(L.h)^{-1}$) y fenol (rfenol, $mg.(L.h)^{-1}$), así como las tasas de producción de glucógeno (rGlu, $mg.(L.h)^{-1}$) y PHA (rPHA, $mg.(L.h)^{-1}$), se calcularon a partir de la pendiente de las curvas de decaimiento/generación en un intervalo de tiempo específico. Además, el consumo de oxígeno (rO_2, $mgO_2.(L.h)^{-1}$) se determinó a partir de la pendiente de la curva de decaimiento de DQO total (Contreras et al., 2007). Las velocidades específicas de consumo (qfenol, $mg.(gST{\cdot}h)^{-1}$ y qDQO, $mgO_2.(gST{\cdot}h)^{-1}$) se calcularon dividiendo las velocidades volumétricas por la concentración de biomasa (ST, $g.L^{-1}$).

Se determinaron el coeficiente de oxidación del sustrato ($y_{O2/S}$) a partir del cociente entre rO_2 y rDQO y los rendimientos de PHA y glucógeno ($y_{PHA/S}$ $y_{Glu/S}$) a partir del cociente entre sus velocidades de producción (rPHA y rGlu) expresadas en unidades de DQO $(mgO2.(L.h)^{-1})$ y rDQO.

Resultados y discusión

En primer lugar, en sistemas batch bajo las diferentes condiciones operativas se logró remoción de fenol a pesar de la elevada concentración inicial y los valores altos de F/M. Sin embargo, en condiciones limitadas en oxígeno, la tasa de consumo fue significativamente más lenta, lo que resultó en un tiempo de ensayo prolongado (Tabla 2, Figura 1). Este comportamiento puede atribuirse a que la limitación de oxígeno reduce la actividad metabólica de los microorganismos, lo que a su vez disminuye la velocidad de degradación del sustrato.

Por otro lado, se analizaron los rendimientos de producción de reservas y coeficiente de oxidación, junto con la fracción de sustrato $y_{PP/S}$ que refleja no sólo las posibles pérdidas de PHA durante los procesos de extracción y purificación sino también la probable formación de subproductos como lípidos. El valor $y_{PP/S}$ es estimado mediante balance de masa, considerando que la suma de todos los rendimientos debe ser igual a 1. Es importante destacar que este valor no está relacionado con el crecimiento celular, ya que, al no haber nitrógeno en el medio, no es posible que ocurra crecimiento.

Independientemente del tipo de limitación (nitrógeno o nitrógeno + oxígeno) (Figuras 1 y 2) se alcanzaron producciones máximas de PHA similares. Sin embargo, al final de los ensayos el sistema LN presentó un mayor contendido porcentual de PHA por unidad de biomasa (%PHA) respecto a los sistemas LNO (Figura 2). Las condiciones LN y LNO-1 presentaron valores similares de $y_{PHA/S}$, mientras que la condición LNO-2 con la relación F/M (alimento/microorganismo) más alta presentó un rendimiento $y_{PHA/S}$ significativamente más bajo (Tabla 2). Estos resultados sugieren que la acumulación de PHA no dependería del tipo de limitación sino de la relación F/M. Estudios

posteriores permitirán confirmar esta hipótesis. No se observó generación de glucógeno en ninguna de las condiciones evaluadas. Esto sugiere que, bajo las condiciones operativas aplicadas, los microorganismos priorizaron la acumulación de PHA como principal reserva de carbono, sin desviar recursos significativos hacia la síntesis de glucógeno. Este comportamiento es consistente con estudios previos que indican que, en condiciones de alta relación F/M y limitación de nutrientes, los microorganismos tienden a acumular PHA como principal polímero de reserva (Berretta Invernizzi, 2023).

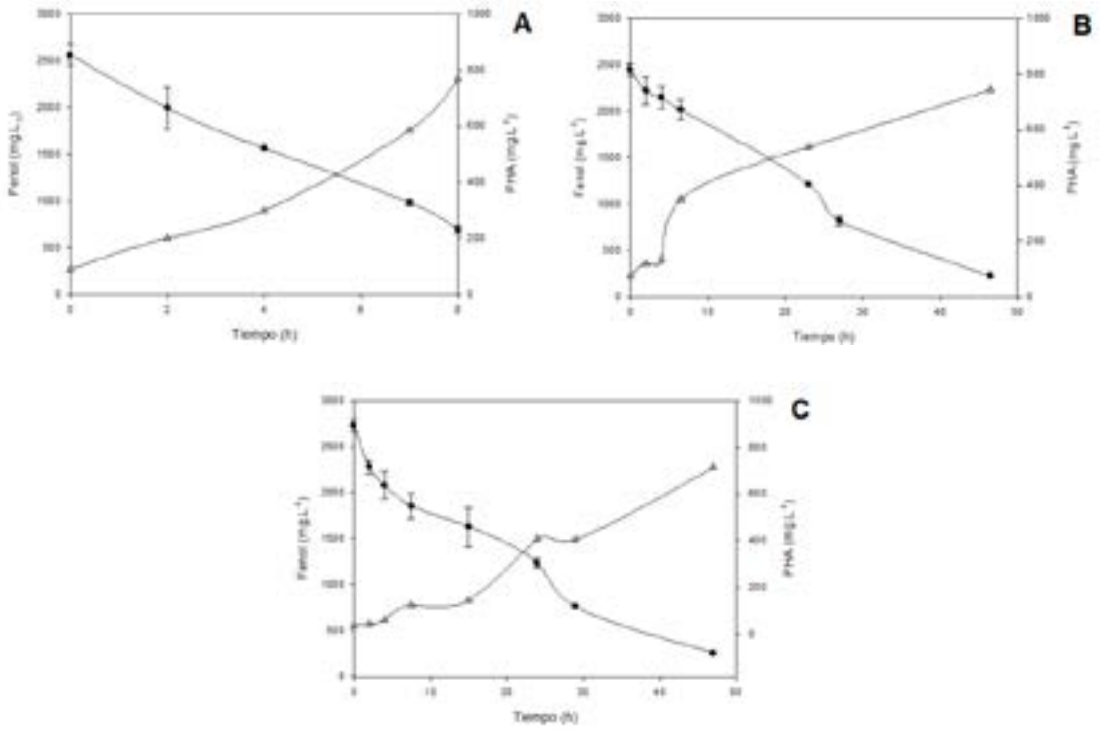


Figura 1. Consumo de fenol y producción de PHA para los diferentes ensayos batch: A) LN, B) LNO-1, C) LNO-2. (●) Fenol (mg.L^{-1}) (▲) PHA (mg.L^{-1}).

Tabla 2: Concentración de oxígeno disuelto (OD, mg.L^{-1}), Duración del ensayo (h), F/M inicial (cmmol fenol.cmmol X^{-1}), coeficiente de oxidación, rendimiento de producción de PHA e $y_{PP/S}$.

Condición	Oxígeno disuelto (OD, mg.L^{-1})	Duración de ensayo (h)	F/M Inicial (cmmol fenol.cmmol X^{-1})	$y_{O2/s}$	$y_{PHA/s}$	$y_{PP/s}$
LN	>4.0	8	3.03	0.47 ± 0.05	0.40 ± 0.06	0.13 ± 0.09
LNO-1	0.9	48	2.60	0.39 ± 0.04	0.42 ± 0.08	0.15 ± 0.20
LNO-2	0.85	48	3.65	0.51 ± 0.04	0.27 ± 0.01	0.22 ± 0.03

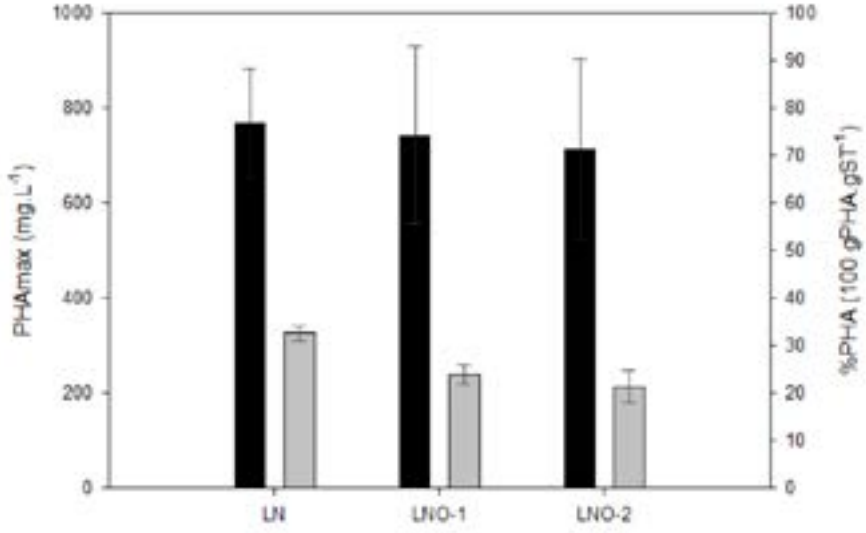


Figura 2. (■) Concentración máxima de PHA (mg.L^{-1}) y (■) Porcentaje de producción de PHA (%PHA, 100 gPHA.gST^{-1}) para los diferentes ensayos batch.

Por último, los resultados muestran que el aumento del F/M se traduce en un incremento del coeficiente de oxidación ($y_{O2/s}$) (Figura 3). Este comportamiento sugiere que, bajo condiciones de alta relación F/M, una mayor proporción del sustrato se oxidó para la producción de energía en lugar de ser almacenado como PHA. Este fenómeno puede estar vinculado a un mayor requerimiento de energía en procesos de detoxificación frente a una mayor carga toxica de fenol por unidad de biomasa.

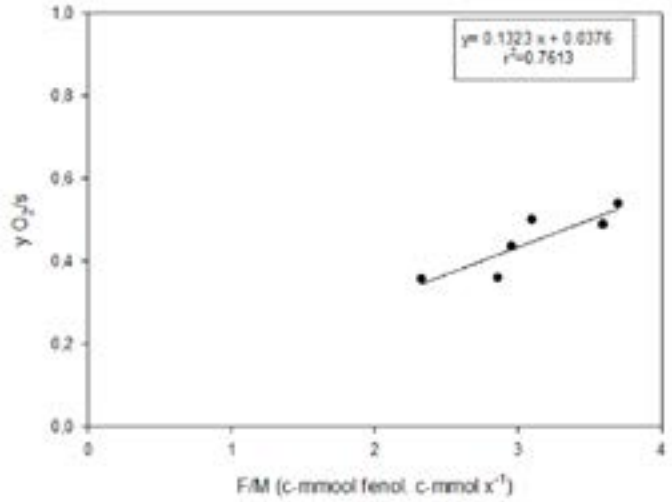


Figura 3: Coeficiente de oxidación de oxígeno (yO_2/s) en función del F/M de los ensayos batch.

Conclusiones

Este trabajo confirma la factibilidad de producir PHA a partir de fenol utilizando biogránulos aeróbicos bajo condiciones limitadas de crecimiento. Se observó que la acumulación de PHA estuvo determinada por altos valores de F/M,

independientemente del tipo de limitación (nitrógeno u oxígeno). Además, no se detectó acumulación de glucógeno, lo que sugiere que el PHA fue la principal reserva de carbono generada. El aumento de la relación F/M resultó en un mayor coeficiente de oxidación, indicando que una mayor proporción del sustrato se destinó a la producción de energía en lugar de ser almacenado como PHA. Estos resultados aportan información relevante para la optimización del proceso y la valorización de efluentes industriales mediante la producción de biopolímeros. Estudios futuros podrán explorar el impacto de otros factores operativos y evaluar su escalabilidad.

Bibliografía

Berretta Invernizzi, G., Zaritzky, N., Ferro Orozco, M., & Caravelli, A. (2023). *SBR granular aeróbico para la producción de polihidroxialcanoatos a partir de un efluente fenólico*. En SACyTA (Ed.), *Libro de actas del V Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, Argentina y Ambiente 2023 (AA2023)*.

Bucci, P., Coppotelli, B., Morelli, I., Zaritzky, N., & Caravelli, A. (2021). Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification performance in a granular sequencing batch reactor supported by next generation sequencing. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *160*, 105210.

Contreras, E., & Menes, R. (2007). Caracterização, monitoramento e controle de processos. Técnicas de medida de atividade (Capítulo XI.1, pp. 621-648). En Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Ed.), *Tratamento biológico de águas residuárias* (pp. 621-648). Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Devlin, T. R., Di Biase, A., Kowalski, M., & Oleszkiewicz, J. A. (2017). Granulation of activated sludge under low hydrodynamic shear and different wastewater characteristics. *Bioresource Technology*, *224*, 229-235.

Jones, P. F., & Johnson, K. E. (1973). Estimation of Phenols by the 4-Aminoantipyrine Method. II. Products from para-Substituted Alkylphenols. *Canadian Journal of Chemistry*, *51*(22), 3733-3737.

Moita, R., Freches, A., & Lemos, P. C. (2014). Crude glycerol as feedstock for polyhydroxyalkanoates production by mixed microbial cultures.*Water research*, *58*, 9-20.

Moralejo-Gárate, H., Palmeiro-Sánchez, T., Kleerebezem, R., Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., & van Loosdrecht, M. C. (2013). Influence of the cycle length on the production of PHA and polyglucose from glycerol by bacterial enrichments in sequencing batch reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, *110*(12), 3148-3155.

Moralejo-Gárate, H., Kleerebezem, R., Mosquera-Corral, A., & van Loosdrecht, M. C. (2013). Impact of oxygen limitation on glycerol-based biopolymer production by bacterial enrichments. *Water research*, *47*(3), 1209-1217.

Raunkjær, K., Hvitved-Jacobsen, T., & Nielsen, P. H. (1994). Measurement of pools of protein, carbohydrate and lipid in domestic wastewater. *Water research*, *28*(2), 251-262.

Reddy, M. V., Nikhil, G. N., Mohan, S. V., Swamy, Y. V., & Sarma, P. N. (2012). *Pseudomonas otitidis* as a potential biocatalyst for polyhydroxyalkanoates (PHA) synthesis using synthetic wastewater and acidogenic effluents. *Bioresource technology*, *123*, 471-479.

Yang, M., Zou, Y., Wang, X., Liu, X., Wan, C., Harder, M., & Zhang, Y. (2022). Synthesis of intracellular polyhydroxyalkanoates (PHA) from mixed phenolic substrates in an acclimated consortium and the mechanisms of toxicity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3), 107944.

Zhang, Y., Wusiman, A., Liu, X., Wan, C., Lee, D. J., & Tay, J. (2018). Polyhydroxyalkanoates (PHA) production from phenol in an acclimated consortium: batch study and impacts of operational conditions. *Journal of biotechnology*, *267*, 36-44.

IALESMATERIALESMATER

CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL Y DESEMPEÑO IN-VITRO DE SUPERFICIES DE TITANIO GRANALLADAS CON TRATAMIENTO BIOACTIVO PARA IMPLANTES DENTALES

Lemos Barboza, Adriana [(1)]; Kang, Kyung Won [(1,2)]; Azpeitía, Anahí [(1)]; Blasetti, Nahuel [(3)] Mayocchi, Karina [(3)]; Gervasi, Claudio [(1,2)]; Llorente, Carlos [(1,2)].

(1) 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).
(2) Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires – CICPBA.
(3) Laboratorio de Biología Molecular y Biotecnología (LBMB), Facultad de Odontología Universidad Nacional de La Plata, Calle 50 entre 1 y 115, La Plata.

adriana.barboza@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

El diseño de implantes dentales busca mejorar la regeneración ósea, reducir tiempos de cicatrización y prevenir complicaciones como enfermedades periimplantarias [1]. La superficie del implante juega un papel clave en la osteointegración, ya que tras la implantación interactúa con el medio biológico, adsorbiendo proteínas que regulan la adhesión y diferenciación celular.

El titanio es ampliamente utilizado en implantes por su biocompatibilidad y resistencia a la corrosión, pero su capa de TiO_2 es bioinerte, lo que puede provocar encapsulación en tejido fibroso y fallas por fatiga o corrosión por fricción [2,3]. Para mejorar su bioactividad, se han desarrollado tratamientos superficiales que modifican la rugosidad, composición química y mojabilidad, promoviendo la unión química con calcio y fósforo para facilitar la osteointegración [4,5].

Entre los tratamientos bioactivos más efectivos destacan el granallado con fosfatos de calcio [6] y el tratamiento alcalino, que forma una capa de titanatos de sodio y es ampliamente utilizado por su bajo costo y facilidad de aplicación [7]. Sin embargo, aún no hay consenso sobre la combinación óptima de características superficiales que maximicen la respuesta biológica, especialmente en la diferenciación de células madre mesenquimales en osteoblastos [8].

Dado que el hueso está compuesto de hidroxiapatita y colágeno, un implante bioactivo debe favorecer la precipitación de hidroxiapatita en su superficie. Para evaluar esta capacidad, la inmersión en Simulated Body Fluid (SBF) es una técnica ampliamente utilizada y ha demostrado predecir la bioactividad in vivo en aproximadamente el 75 % de los estudios [9].

PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizaron muestras de titanio grado 4 (ASTM F67-06) de 10 mm de diámetro, mecanizadas y sometidas a limpieza. Se aplicó un pretratamiento superficial por granallado con partículas de fosfato de calcio (300 µm, 6 bar, 2 min), seguido de limpieza. Posteriormente, las muestras fueron tratadas en NaOH 10 M a 60 °C durante 24 horas para generar una capa bioactiva de hidrogel de titanato de sodio.

Las muestras se caracterizaron mediante distintas técnicas. La topografía y rugosidad se analizaron con SEM y estereometría. La composición química se determinó por EDS y espectroscopía Raman, mientras que el espesor del recubrimiento se midió con imágenes de electrones retrodispersados en SEM. Se estudió la carga superficial mediante la medición del potencial zeta en SBF a 37 °C y la mojabilidad a partir del ángulo de contacto de gota sésil. La resistencia a la corrosión se evaluó con espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) en SBF a 25 °C tras 60 min de inmersión en circuito abierto.

La bioactividad se determinó mediante inmersión en SBF a 37 °C y pH 7.4 por 72 h, analizando la formación de hidroxiapatita por SEM y EDS. Finalmente, se realizaron ensayos in vitro con células madre mesenquimales (MSCs) de pulpa dental, cultivadas en medio DMEM/F12. Se sembraron 20,000 células por muestra e incubaron 48 h a 37 °C en atmósfera con 5 % de CO_2, y luego se analizaron por SEM y EDS.

RESULTADOS Y DISCUSION

El tratamiento de granallado con partículas de fosfato de calcio se utilizó para modificar la topografía de la superficie del titanio, generando una morfología rugosa con la incorporación de trazas de Ca y P (Fig. 1a)[6]. La rugosidad media obtenida en la muestra B fue de 1.39 µm, valor que se encuentra dentro del rango de rugosidad moderada (1-2 µm) recomendado para favorecer la osteointegración [10]. Adicionalmente, la distribución de alturas mostró una leve predominancia de valles sobre picos, lo que sugiere una mayor retención de fluidos en la superficie (Fig. 2)[11].

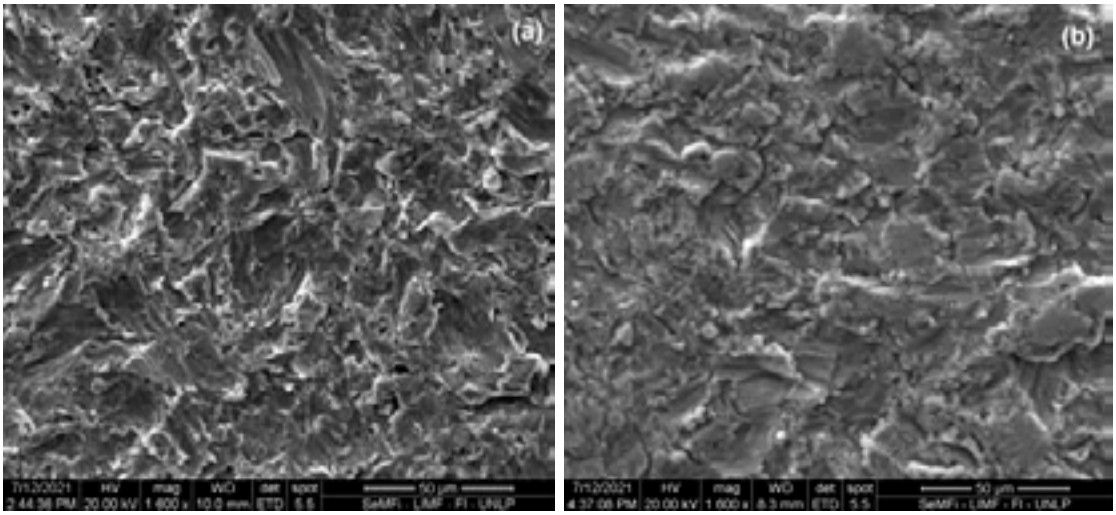


Figura 1. Topografía a baja magnificación de las muestras (a) B, (b) BNa

Tras la aplicación del tratamiento alcalino en NaOH, se observó la formación de una capa nanoporosa de titanato de sodio sobre la superficie granallada (Fig. 1b), con un espesor de 1.6 ± 0.6 µm [12]. La espectroscopía Raman confirmó la conversión de la superficie a una fase de titanato de sodio amorfo o microcristalino ($Na_2Ti_3O_7$) (Fig. 2) [13]. Este recubrimiento es conocido por su bioactividad, ya que facilita la adsorción de iones calcio y fósforo del medio biológico [14]. A nivel topográfico, la rugosidad media (Sa) de la muestra BNa se mantuvo prácticamente sin cambios con respecto a la muestra B (1.41 µm), pero se observó una reducción en la proporción de valles, lo que indica una alteración en la distribución de la topografía [11].

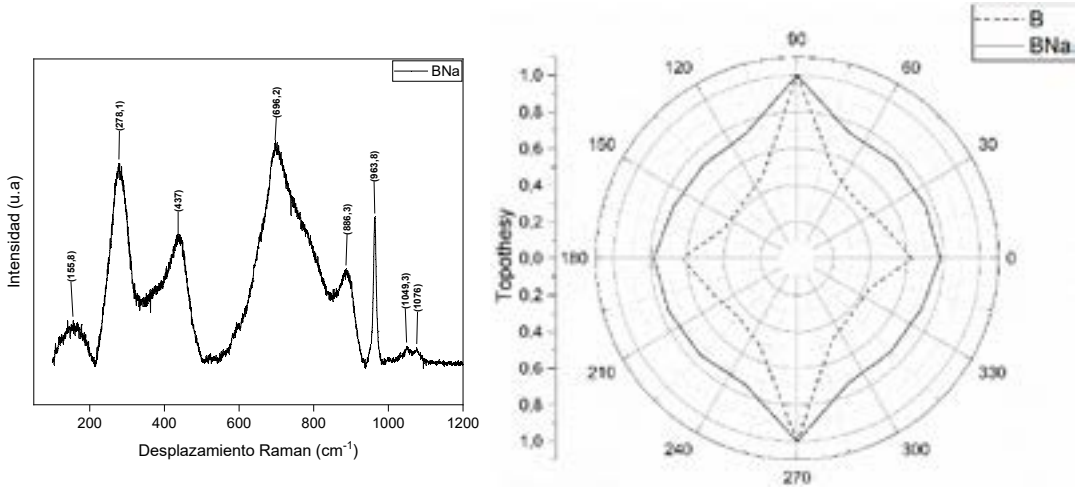


Figura 2. Espectro Raman correspondiente a la muestra BNa y gráfico polar del parámetro Topothesy K normalizado a sus respectivos valores máximos para las muestras B y BNa.

En términos de mojabilidad, el tratamiento alcalino transformó la superficie moderadamente hidrofílica de la muestra B (80.1° de ángulo de contacto) en una superficie superhidrofílica (19.1° de ángulo de contacto) [15]. Este cambio es atribuible a la presencia de grupos hidroxilo en la capa de titanato de sodio, que incrementan la energía superficial y promueven la adhesión celular [16].

El análisis del potencial zeta mostró que ambas superficies adquirieron carga negativa en SBF. Sin embargo, la muestra BNa presentó un menor valor absoluto de potencial zeta que la muestra B (-8.1 mV vs -17.6 mV, respectivamente), lo que sugiere una mayor reactividad superficial e interacción con los iones del medio [17]. Este comportamiento se correlaciona con la capacidad de intercambio iónico del titanato de sodio, el cual facilita la adsorción de iones calcio y fósforo, favoreciendo la nucleación de hidroxiapatita[18].

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) reveló diferencias significativas en la estructura de la película superficial (Fig. 8, 10). En la muestra B, se identificó una única capa barrera con una resistencia de 1.57 × 10^5 Ω, mientras que en la muestra BNa se formó una doble capa compuesta por una capa externa porosa y una capa interna compacta. La resistencia de la capa interna en BNa (1.25 × 10^6 Ω) fue un orden de magnitud superior a la de la muestra B, lo que indica una mejora en la protección contra la corrosión [19].

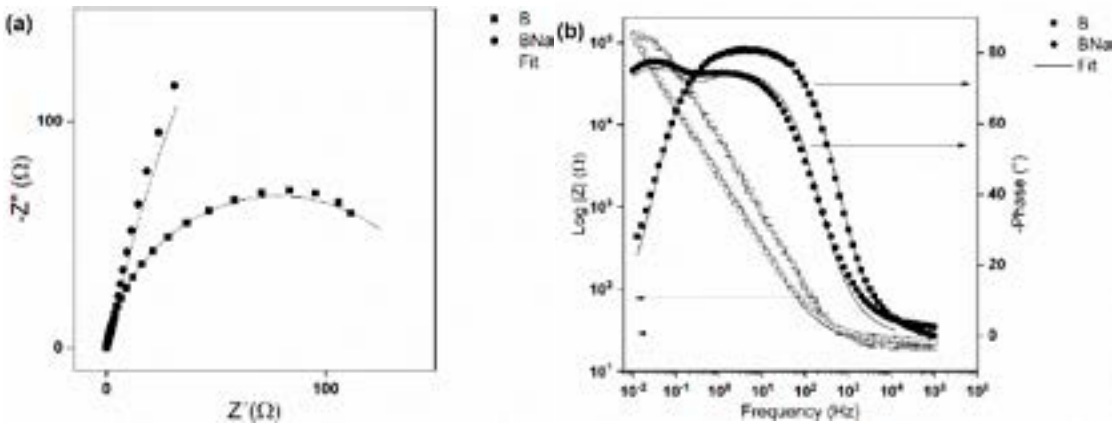


Figura 3. Espectros EIS de las muestras B y BNa en solución SBF. (a) Diagramas de Nyquist, donde Z'' es la parte imaginaria de Z y Z' es la parte real de Z. (b) Diagramas de Bode del ángulo de fase (símbolos sólidos) y del módulo de impedancia (símbolos abiertos).

El ensayo de inmersión en fluido corporal simulado (SBF) durante 72 horas confirmó la bioactividad inducida por el tratamiento alcalino. En la muestra B, la precipitación de hidroxiapatita fue escasa y localizada (Fig. 4a) [20]. En contraste, la muestra BNa mostró una cobertura homogénea de un precipitado con morfología acicular, característico de la hidroxiapatita (Fig. 4b)[5], [9]. Este fenómeno se debe a la capacidad de la capa de titanato de sodio para intercambiar Na^{+} por Ca^{2+}, promoviendo la nucleación y crecimiento de hidroxiapatita [18]. El análisis por EDS evidenció un aumento en la concentración de calcio y fósforo tras la inmersión en SBF, con una relación Ca/P cercana a 1.67, similar a la de la hidroxiapatita natural (Fig. 4b) [21].

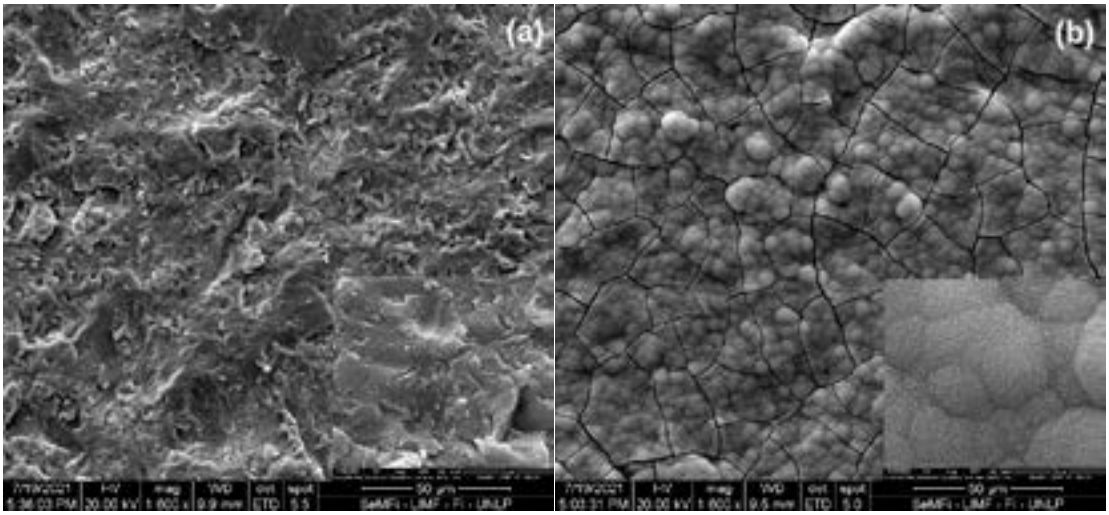


Figura 4. Muestras (a) B, (b) BNa, después de 3 días de inmersión en SBF. Se observan partículas esféricas con una subestructura en forma de aguja en los precipitados superficiales de las muestras BNa (b).

Los ensayos con células madre mesenquimales de pulpa dental confirmaron que ambas superficies eran biocompatibles, sin signos de citotoxicidad (Fig. 15a, 15b) [22]. Sin embargo, la muestra BNa mostró una mayor proliferación celular, con células adoptando morfologías fusiformes y formando extensas proyecciones citoplasmáticas que se anclaban a la estructura nanoporosa de la superficie (Fig. 15b) [23]. Además, se observó la precipitación de hidroxiapatita en torno a las células adheridas (Fig. 16), lo que indica un entorno favorable para la diferenciación osteogénica [24].

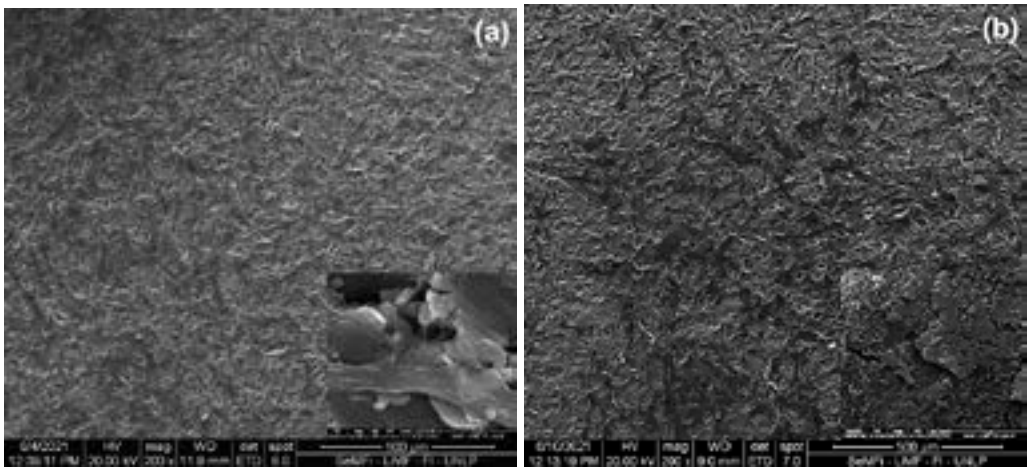


Figura 15. Imágenes SEM después de 48 hrs de cultivo con MSCs. (a) B, (b) BNa (24.000x).

CONCLUSIONES

El estudio evaluó el impacto del tratamiento alcalino sobre la bioactividad y biocompatibilidad de superficies de titanio granalladas para implantes dentales. Los resultados mostraron que dicho tratamiento genera una capa nanoporosa de titanato de sodio con carga negativa, mejorando la interacción con fluidos biológicos y favoreciendo la adsorción de proteínas y células.

Se confirmó que ambas superficies mantuvieron rugosidades óptimas (Sa = 1-2 µm), aunque la tratada con NaOH mostró mayor porosidad a escala nanométrica. Además, el tratamiento alcalino transformó la superficie en superhidrofílica (ángulo de contacto de 19.1°), favoreciendo la adhesión celular. El potencial zeta indicó mayor reactividad en la muestra tratada, facilitando el intercambio iónico en SBF.

Los estudios electroquímicos revelaron que la muestra tratada con NaOH presentó una doble capa estructural (interna compacta y externa porosa), lo que mejoró su resistencia a la corrosión y favoreció el transporte iónico. En términos de bioactividad, la muestra tratada en NaOH mostró una mayor capacidad de precipitación de hidroxiapatita en SBF, lo que sugiere un alto potencial osteogénico.

Los ensayos in vitro demostraron que ambas superficies son biocompatibles, pero la tratada con NaOH promovió una mayor adhesión y proliferación celular, con indicios de diferenciación osteogénica temprana. En conclusión, el tratamiento alcalino mejora significativamente la bioactividad y la integración ósea de los implantes al mantener una rugosidad óptima, incrementar la hidrofilicidad y favorecer la formación de hidroxiapatita, lo que podría mejorar el desempeño clínico de los implantes tratados.

BIBLIOGRAFIA

[1] Y. Gai *et al.*, “Rational Design of Bioactive Materials for Bone Hemostasis and Defect Repair,” *Cyborg Bionic Syst.*, vol. 4, pp. 1–14, 2023, doi: 10.34133/CBSYSTEMS.0058.

[2] J. W. Nicholson, “Titanium Alloys for Dental Implants: A Review,” *Prosthesis*, vol. 2, no. 2, pp. 100–116, 2020, doi: 10.3390/prosthesis2020011.

[3] V. Goriainov, R. Cook, J. M. Latham, D. G. Dunlop, and R. O. C. Oreffo, “Bone and metal: An orthopaedic perspective on osseointegration of metals,” *Acta Biomater.*, vol. 10, no. 10, pp. 4043–4057, 2014, doi: 10.1016/j.actbio.2014.06.004.

[4] R. Ji *et al.*, “Study on high wear resistance surface texture of electrical discharge machining based on a new water-in-oil working fluid,” *Tribol. Int.*, vol. 180, no. December 2022, p. 108218, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108218.

[5] S. Ferraris *et al.*, “Bioactive materials: In vitro investigation of different mechanisms of hydroxyapatite precipitation,” *Acta Biomater.*, vol. 102, pp. 468–480, 2020, doi: 10.1016/j.actbio.2019.11.024.

[6] F. Zamparini, C. Prati, L. Generali, A. Spinelli, P. Taddei, and M. G. Gandolfi, “Micro-nano surface characterization and bioactivity of a calcium phosphate-incorporated titanium implant surface,” *J. Funct. Biomater.*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.3390/jfb12010003.

[7] R. Kobatake *et al.*, “Comparative Study of Surface Modification Treatment for Porous Titanium,” *J. Oral Maxillofac. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–8, 2020, doi: 10.5037/jomr.2020.11205.

[8] T. Hanawa, “Titanium-tissue interface reaction and its control with surface treatment,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 7, no. JUL. Frontiers Media S.A., 2019, doi: 10.3389/fbioe.2019.00170.

[9] F. Baino and S. Yamaguchi, “The use of simulated body fluid (SBF) for assessing materials bioactivity in the context of tissue engineering: Review and challenges,” *Biomimetics*, vol. 5, no. 4, pp. 1–19, 2020, doi:

10.3390/biomimetics5040057.

[10] G. R. M. Matos, “Surface Roughness of Dental Implant and Osseointegration,” *J. Maxillofac. Oral Surg.*, vol. 20, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s12663-020-01437-5.

[11] W. P. Dong, P. J. Sullivan, and K. J. Stout, “Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography. III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties,” *Wear*, vol. 178, no. 1–2, pp. 29–43, 1994, doi: 10.1016/0043-1648(94)90127-9.

[12] H. M. Kim, F. Miyaji, T. Kokubo, and T. Nakamura, “Preparation of bioactive Ti and its alloys via simple chemical surface treatment,” *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 32, no. 3, pp. 409–417, 1996, doi: 10.1002/(SICI)1097-4636(199611)32:3<409::AID-JBM14>3.0.CO;2-B.

[13] U. Balachandran and N. G. Eror, “Raman spectra of titanium dioxide,” *J. Solid State Chem.*, vol. 42, no. 3, pp. 276–282, May 1982, doi: 10.1016/0022-4596(82)90006-8.

[14] M. Ocaña, J. V. Garcia-Ramos, and C. J. Serna, “Low-Temperature Nucleation of Rutile Observed by Raman Spectroscopy during Crystallization of TiO2,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 75, no. 7, pp. 2010–2012, 1992, doi: 10.1111/j.1151-2916.1992.tb07237.x.

[15] K. Nakata and A. Fujishima, “TiO 2 photocatalysis: Design and applications,” *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 13, no. 3, pp. 169–189, 2012, doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001.

[16] S. Tugulu, K. Löwe, D. Scharnweber, and F. Schlottig, “Preparation of superhydrophilic microrough titanium implant surfaces by alkali treatment,” *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 21, no. 10, pp. 2751–2763, 2010, doi: 10.1007/s10856-010-4138-x.

[17] R. Xu, “Electrophoretic Light Scattering BT - Particle Characterization: Light Scattering Methods,” R. Xu and B. Scarlett, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002, pp. 289–343.

[18] H. M. Kim, T. Himeno, M. Kawashita, J. H. Lee, T. Kokubo, and T. Nakamura, “Surface potential change in bioactive titanium metal during the process of apatite formation in simulated body fluid,” *J. Biomed. Mater. Res. - Part A*, vol. 67, no. 4, pp. 1305–1309, 2003, doi: 10.1002/jbm.a.20039.

[19] C. Aparicio, F. Javier Gil, C. Fonseca, M. Barbosa, and J. A. Planell, “Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications,” *Biomaterials*, vol. 24, no. 2, pp. 263–273, 2003, doi: 10.1016/S0142-9612(02)00314-9.

[20] A. A. Zadpoor, “Relationship between in vitro apatite-forming ability measured using simulated body fluid and in vivo bioactivity of biomaterials,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 35, no. 1, pp. 134–143, 2014, doi: 10.1016/j.msec.2013.10.026.

[21] U. Anjaneyulu, D. K. Pattanayak, and U. Vijayalakshmi, “Snail Shell Derived Natural Hydroxyapatite: Effects on NIH-3T3 Cells for Orthopedic Applications,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 2, pp. 206–216, 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1070415.

[22] K. Masuda *et al.*, “Dental pulp-derived mesenchymal stem cells for modeling genetic disorders,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 5, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/ijms22052269.

[23] J. Gil *et al.*, “Mineralization of titanium surfaces: Biomimetic implants,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 11, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/ma14112879.

[24] M. J. Dalby *et al.*, “The control of human mesenchymal cell differentiation using nanoscale symmetry and disorder,” *Nat. Mater.*, vol. 6, no. 12, pp. 997–1003, 2007, doi: 10.1038/nmat2013.

ELECTRODEPOSICIÓN DE ESTAÑO EN OXALINA, UN SOLVENTE EUTÉCTICO PROFUNDO BASADO EN CLORURO DE COLINA Y ÁCIDO OXÁLICO

Tsunoda Sofía[a,b], Azpeitia Leticia A.[a, b], Rodríguez-Presa María J.[a], Gervasi Claudio A.[a,b], Bolzán Agustín E.[a]

[a]Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Sucursal 4., Casilla de Correo 16, (1900) La Plata, Argentina; [b]Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF) Facultad de Ingeniería, UNLP, 1 y 47, (1900) La Plata, Argentina.
sofia.tsunoda@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Los solventes eutécticos profundos (DES) son considerados solventes estratégicos con gran potencial para aplicaciones tecnológicas entre las cuales se destaca la electrodeposición de metales [1]. Estos solventes presentan ventajas significativas debido a su bajo impacto ambiental y sus propiedades únicas en comparación con los solventes acuosos convencionales. Un área particular de interés es la electrodeposición de estaño, fundamental en aplicaciones industriales como el recubrimiento de estaño para aceros (*tin-plate*) o el desarrollo de ánodos de estaño para baterías de iones de litio.

Nuestro grupo de investigación ha abordado el estudio de la electrodeposición de estaño desde soluciones de sales de Sn en DES de pH neutro y básico [2]. No obstante, la investigación sobre DES con pH ácido, especialmente en lo que respecta al electrodepósito de estaño, es aún limitada.

En el presente trabajo, se ha estudiado la electrodeposición de estaño desde una solución en el solvente oxalina, un DES constituido por cloruro de colina y ácido oxálico, con un pH de 1,32. El estudio explora el efecto de la naturaleza del sustrato (carbono vítreo GC y cobre policristalino Cu) y de las rutinas de electrodeposición, sobre las características de los depósitos obtenidos. Para ello se caracterizó la reacción de electrodeposición de Sn aplicando estudios electroquímicos consistentes en mediciones voltamperométricas y cronoamperométricas. En base a estos resultados se obtuvieron depósitos de estaño aplicando escalones de potencial a distintos tiempos de duración, como así también rutinas galvanostáticas de ondas cuadradas de corriente.

Parte experimental

La preparación del DES de oxalina se realizó mezclando cloruro de colina (Sigma Aldrich 98%) y ácido oxálico (BioPack P.A.) en una proporción 1:1 M con 0,1 M de $SnCl_2.2H_2O$ (Anedra P.A.) a una temperatura de 323K.

Los experimentos electroquímicos se realizaron en una celda vidrio termostatizada a la misma temperatura indicada anteriormente. Se utilizó una configuración de tres electrodos; una espiral de platino como contraelectrodo, un alambre de plata como electrodo de referencia y como electrodo de trabajo se emplearon electrodos de Cu (0,196 cm^2) o GC (0,0962 cm^2).

Antes de cada experimento, los electrodos fueron pulidos con una suspensión de alúmina 0,3 µm y la solución de oxalina fue burbujeada con nitrógeno para remover el aire que pudiere haber quedado en ella.

Las medidas se realizaron empleando un potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 128N, controlado por el software Nova 2.1.

Las caracterizaciones morfológicas de los depósitos de Sn obtenidos se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido (FEI Quanta 250 ESEM). Para la determinación del tamaño y la distribución del tamaño de partículas, se realizó un procesamiento de imagen con el software ImageJ.

Resultados y discusión

i. Respuesta voltamperométrica

Los voltamperogramas obtenidos sobre GC en el rango de -0,1 V a -0,6 V muestran un pico en la corriente de naturaleza catódica y otro en la anódica, correspondientes a la reducción de los iones Sn^{+2} sobre la superficie del electrodo y su oxidación, respectivamente. Al analizar la relación de la corriente del pico catódico con la raíz cuadrada de la velocidad de barrido del potencial de electrodo, se encuentra una relación lineal, indicando una reacción controlada por difusión según, [3]

$$|I_p| = 0{,}4463A(\frac{F^3}{RT})^{\frac{1}{2}}n^{\frac{3}{2}}C_0D^{\frac{1}{2}}v^{\frac{1}{2}}$$

en donde I_p, A, F, R, T, n, C_o, D y v corresponden a la corriente de pico, el área, la constante de Faraday, la constante universal de los gases, la temperatura de trabajo, el número de electrones transferidos por equivalente electroquímico de la especie descargada, la concentración de iones Sn^{+2} en solución, su coeficiente de difusión y la velocidad de barrido, respectivamente.

En el caso de los voltamperogramas medidos para la electrodeposición sobre Cu entre -0,15 V y -0,6 V, se observa una corriente con un pico catódico o de reducción de los iones Sn^{+2} a Sn^0 y una contribución anódica, correspondiente a la oxidación de dicho depósito. A bajas velocidades de barrido (5 y 10 mV/s), el pico anódico aparece desdoblado como un pico mayor y un hombro. Al realizar barridos catódicos acotando el límite de conmutación del potencial en -0,40 V (previo a la región de electrodeposición masiva de Sn sobre Sn), es posible observar la presencia de dos contribuciones pequeñas con corrientes de pico catódicas, que pueden asociarse a la electrodeposición de Sn a subpotenciales (UPD) [2].

ii. Respuesta cronoamperométrica

Se determinó el modelo de nucleación y crecimiento de la nueva fase de Sn depositado para el caso de sustratos de GC. Se analizaron los transitorios resultantes de aplicar escalones de potencial hasta valores en donde ocurre la reacción de reducción de Sn^{+2} a Sn^0 (a -0,46V y -0,54V). Dichos transitorios evidencian un rápido aumento de la corriente como una función de $t^{1/2}$, indicando un proceso de nucleación instantánea [4] y una caída de la corriente como función de $t^{-1/2}$, típica de un proceso controlado por difusión según ec. de Cottrell [3] y coincidente con el resultado voltamperométrico.

Los transitorios de corriente registrados para el Cu muestran un comportamiento más complejo, en donde existe una primera caída abrupta de la corriente, seguido de un pequeño hombro a partir del cual la corriente comienza a disminuir lentamente en el tiempo. Es posible prever que, para el caso del Cu, la reacción de descarga de hidrógeno tenga influencia sobre la reacción de electrodeposición de estaño, generando un solapamiento de ambas contribuciones de corriente.

iii. Depósitos obtenidos potenciostática- y galvanostáticamente

Las figuras 1 a) y b) corresponden a micrografías de los depósitos obtenidos sobre GC y sobre Cu respectivamente, al aplicar un potencial constante de -0,46 V durante 30 segundos. En el caso del GC el depósito generado tiene un bajo cubrimiento de la superficie del electrodo y consta de partículas tetraédricas con bordes redondeados y con tamaños en un rango entre los 1,5 y 2 µm. En el caso del Cu, el depósito exhibe un mayor grado de cobertura del electrodo y las partículas presentan características facetadas. Las mismas se encuentran distribuidas de forma aleatoria, salvo en aquellas zonas en donde se evidencia un crecimiento preferencial guiado por las líneas de pulido del electrodo. Se observa una población de partículas de 1 a 1,5 µm aproximadamente, y una segunda población de partículas más pequeñas de crecimiento incipiente.

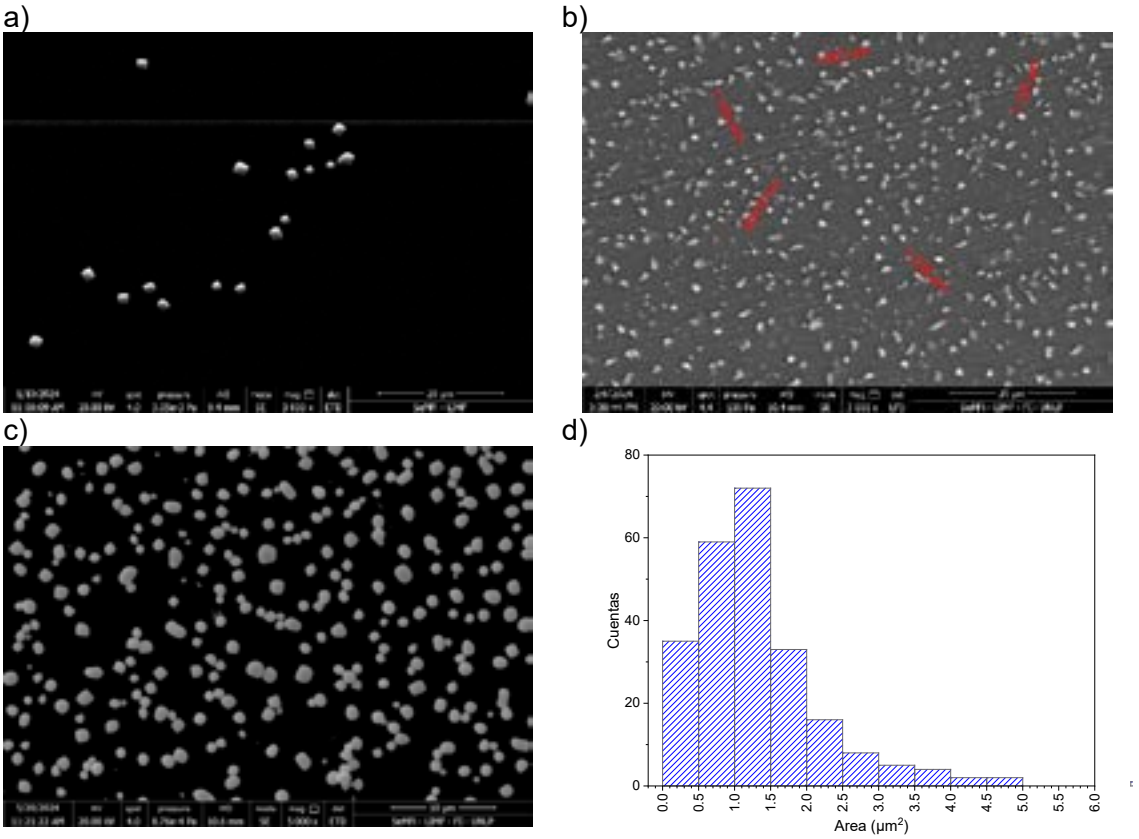


Figura 1. a) y b) Depósitos obtenidos a -0.46 V durante 30 segundos sobre GC y Cu respectivamente. c) y d) Depósito obtenido sobre GC mediante una técnica galvanostática con ja=0 mA/cm2 ta=40 ms, jc=-10 mA/cm2 tc=4ms, con N=12000 ciclos. Histograma del tamaño de partículas del depósito obtenido con las condiciones c)

Finalmente, la figura 1 c) muestra un depósito obtenido sobre GC a partir de una rutina galvanostática en donde se aplicó un salto de corriente de j_c=-10 mA/cm^2 durante t_c=4 ms, seguido de una etapa de j_a=0 mA/cm^2 durante t_a=40 ms, repetido N=12000 veces. Aquí, el depósito observado presenta partículas tetraédricas de bordes redondeados y distribución homogénea sobre la superficie del electrodo. En la figura 1 d) se muestra un histograma de la distribución del tamaño de partículas, en donde se observa que la mayor parte de las mismas presenta un área que está acotada en el rango de 0,5 a 1,5 µm^2.

Conclusiones

Los resultados voltamperométricos establecieron una cinética de control difusional en la electrodeposición de Sn. Existe una complejización del mecanismo de reacción al pasar de GC a Cu como sustrato, con la aparición de una electrodeposición de Sn a subpotenciales.

Los transitorios de corriente en GC indican que el proceso de electrodeposición de Sn sucede por una nucleación instantánea y crecimiento con control difusional. En el caso del Cu, el proceso es más complejo, por la contribución adicional de la reacción de evolución de hidrógeno.

Se obtuvieron depósitos sobre GC y Cu tanto en condiciones potenciostáticas como galvanostáticas. Los depósitos sobre GC muestran partículas tetraédricas con bordes redondeados con un tamaño de partícula dominante, mientras que sobre el Cu las partículas son facetadas y con mayor variación en el tamaño entre ellas.

Bibliografía

[1] L.I.N. Tomé, V. Baião, W. da Silva, C.M.A. Brett, *Applied Materials Today* 10 **(2018)**, 30-50.

[2] L. A. Azpeitia, C. A. Gervasi, A. E. Bolzán, Electrochemical formation of Sn films on copper by overpotential and underpotential electrodeposition in deep eutectic solvents, *J. Electroanal. Chem*. **(2023)** doi:10.1016/j.jelechem.2023.117637, 944.

[3] A. J. Bard, L. R. Faulkner, Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications, 2nd Edition, **(2001)** John Wiley & Sons, New York.

[4] G. Gunawardena, G. Hills, I. Montenegro, B. Scharifker, Electrochemical nucleation. Part I. General considerations, *J. Electroanal. Chem*. 138 (2) **(1982)** doi:10.1016/0022-0728(82)85080-8, 225-239.

ANÁLISIS DE FALLA DE UN CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE PRUEBA DE FATIGA

Bonvicini Menéndez, Pablo F.; Urrutipi, Facundo; Echarri, Juan M.; Martínez, Ángel J.; Bilmes, Pablo D.; Llorente, Carlos L.

Laboratorio de Investigaciones en Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminsky" (LIMF) – Facultad de Ingeniería – UNLP – CIC PBA
48 y 116, La Plata, Buenos Aires, Argentina
pablo.bonvicini@ing.unlp.edu.ar

Introducción

Durante una prueba de fatiga, efectuada sobre un cilindro hidráulico (ver Figura 1) se detectó la pérdida de fluido hidráulico a través de la junta soldada de una de sus tapas.



Figura 1 Fotografía recepción del cilindro hidráulico fallado. En recuadro rojo, se señala la zona donde ocurrió la fuga en la unión soldada tubo-tapa.

Desarrollo Experimental y Discusión de Resultados

Sobre el conjunto hidráulico recibido se realizaron los siguientes ensayos:

- Inspección y documentación visual y macrográfica de la pieza y los daños por fisuración mediante tintas penetrantes.
- Análisis fractográfico mediante lupa estereoscópica marca LEICA modelo S8APO equipado con software comercial de adquisición y análisis de imagen Leica Application Suite (LAS Core) V4 y mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) SEM Fei Quanta 200.
- Caracterización microestructural de los elementos constituyentes del cilindro mediante microscopía óptica (campo claro) empleando un microscopio óptico (MO) marca LEICA modelo DM 4000 M LED equipado con software comercial de análisis de imagen Leica Application Suite (LAS Core) V4.8, a lo largo de la circunferencia de la soldadura.
- Análisis químico sobre los elementos constituyentes del cilindro mediante espectroscopia de emisión óptica (OES), empleando espectrómetro Oxford Foundry Master.
- Perfil de Microdureza sobre el cordón de soldadura Tapa-Tubo, empleando un microdurómetro PETRI.

En la Figura 2 se muestra una fotografía del resultado de las tintas penetrantes. Puede notarse la presencia de manchas de fluido hidráulico sobre el cordón de soldadura de la unión tapa-tubo del cilindro hidráulico, luego de aplicar el revelador. En la Figura 3 se muestran fractografías de la tapa y el tubo en la región donde se identificó previamente la pérdida de

fluido hidráulico. Allí es posible observar falta penetración sobre la raíz de la junta (indicado con flechas rojas) y porosidad en el metal de soldadura (indicado con flechas amarillas).

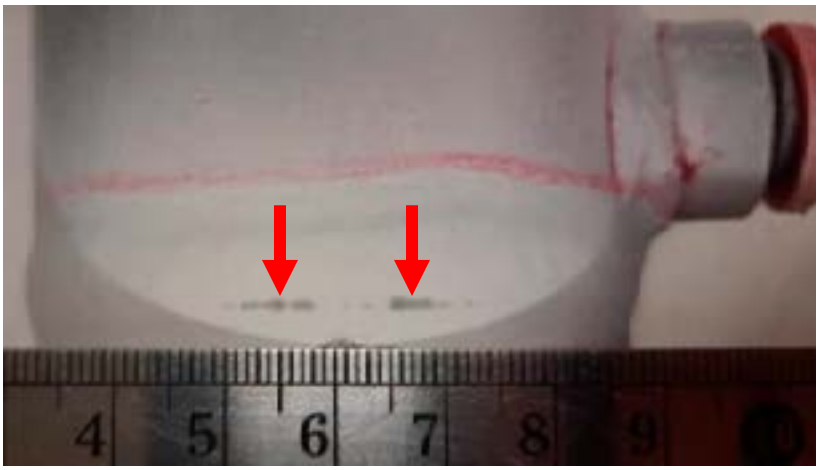


Figura 2 Fotografía del extremo del cilindro hidráulico, con ensayo de tintas penetrantes sobre cordón de soldadura de unión tubo-tapa, donde se evidencia fuga de fluido hidráulico (*señalado con flechas rojas*).

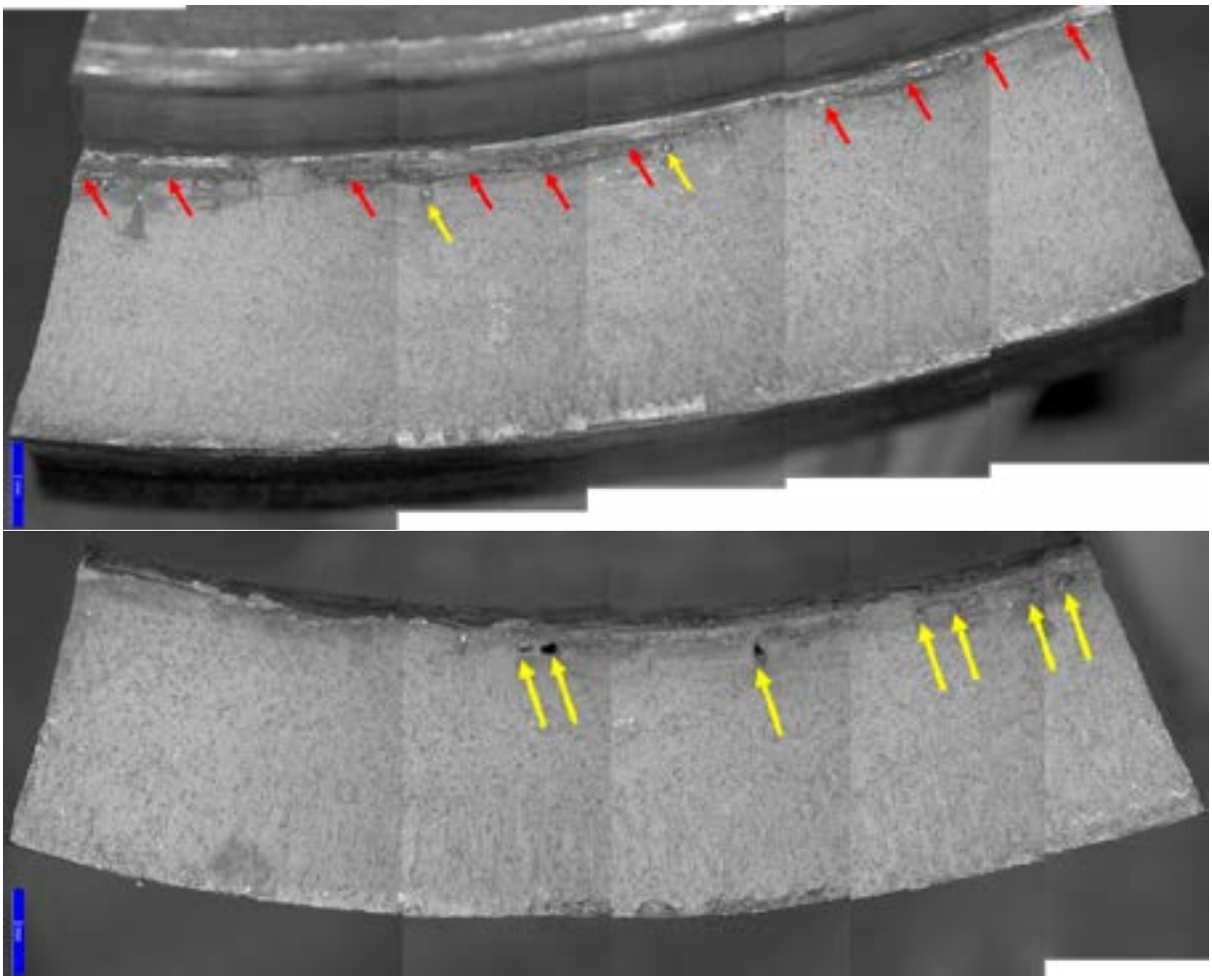


Figura 3 Fotografías macro con lupa estereoscópica. **(*Sup.*)** Superficie de fractura de la tapa sobre la región de la pérdida. **(*Inf.*)** Superficie de fractura del tubo sobre la región de la pérdida. Las flechas rojas señalan zonas donde se evidencia falta de penetración. Las flechas amarillas señalan porosidad encontrada en el metal de soldadura.

En la Figura 4 se muestran fractografías de la misma región que la Figura 3, obtenidas mediante MEB. Allí también es posible observar con detalle la presencia de marcas de iniciación de fisuración, presencia de poros y falta de penetración, al observarse las características superficiales del mecanizado de ambas partes del conjunto (*indicado con flechas verdes*).

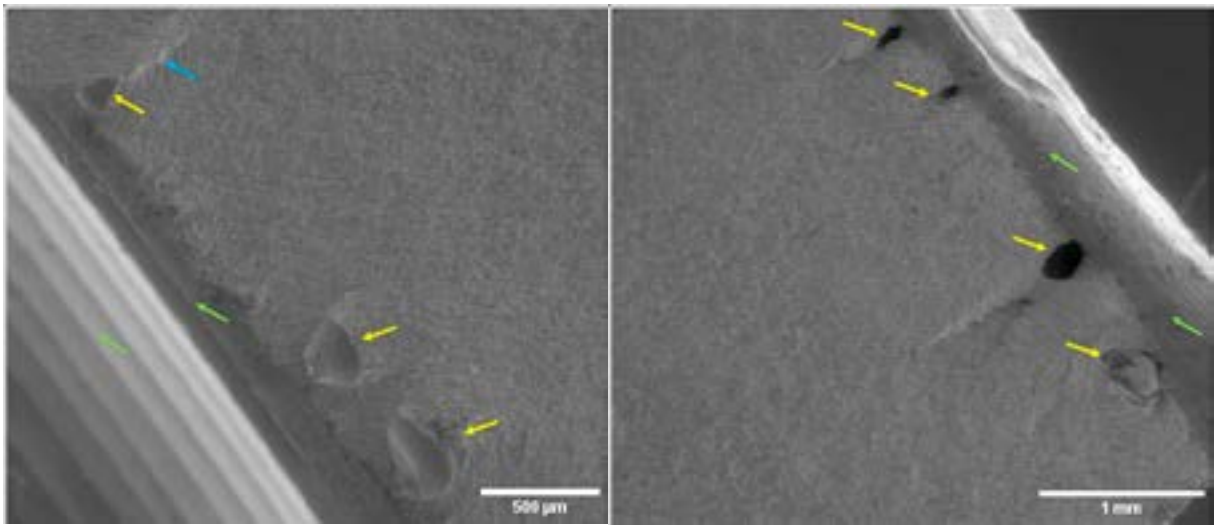


Figura 4 Fractografías MEB. (*Izq.*) Superficie de fractura de la tapa sobre la región de la pérdida. (*Der.*) Superficie de fractura del tubo sobre la región de la pérdida. Las flechas celestes señalan las marcas de iniciación (*Ratchet Marks*) de fisuración, las flechas amarillas presencia de porosidad sobre el metal de soldadura y las flechas verdes indican la superficie mecanizada de los componentes del conjunto hidráulico.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis químicos elementales sobre la tapa y el tubo del cilindro hidráulico. El material de la tapa se corresponde con un acero al carbono del tipo AISI 1045 (*ASTM A 29*), mientras que el material del tubo se corresponde composicionalmente con un tubo sin costura Grado HC520.

Tabla 1 Análisis químico elemental de los elementos constitutivos del conjunto hidráulico

Id.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
Tapa	*0,435*	*0,25*	*0,80*	*0,03*	*0,02*	*0,03*	*Bal.*
Tubo	*0,16*	*0,36*	*1,31*	*0,025*	*0,011*	*0,016*	*Bal.*

Espectrómetro Oxford Foundry Master

En las Figuras 5 y 6 se muestra una micrografía sin y con ataque, respectivamente, de la junta en la región de la pérdida. Se evidencia en recuadro rojo la falta de penetración de la soldadura sobre la tapa y el tubo del conjunto, y el desarrollo de una fisura pasante sobre el metal de soldadura en correspondencia con dicha falta de penetración en la raíz de la junta. También se pone en evidencia la presencia de porosidad en el metal de soldadura. En la Figura 7 se muestran las micrografías de las distintas regiones de la unión soldada. Las microestructuras encontradas son perlítico-ferríticas para el caso del metal base de la tapa y ferrítico-perlíticas para el tubo, en correspondencia con la composición química encontrada para cada material. Por otro lado, las microestructuras de la ZAC del lado de la tapa, del metal de soldadura y de la ZAC del tubo son típicas para este tipo de soldadura por fusión, no presentando discontinuidades ni estructuras duras y frágiles, esto último está en concordancia con los niveles de dureza encontrados en cada región, que se vuelcan en la Tabla 2.

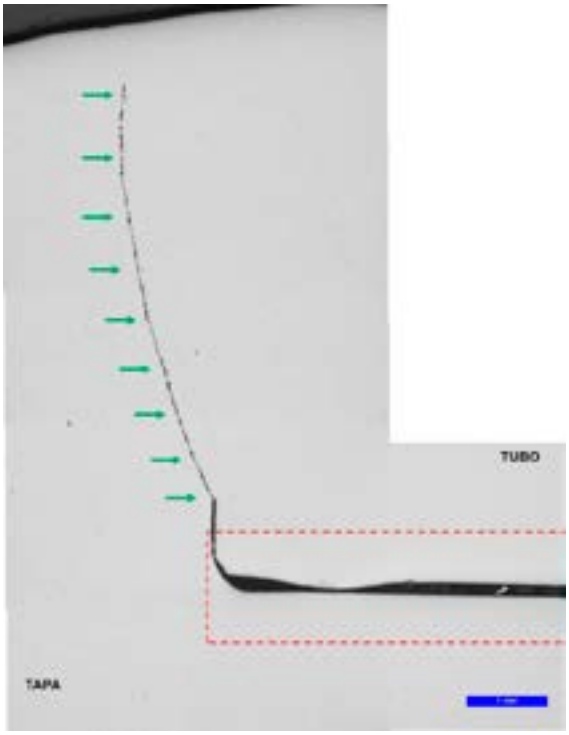


Figura 5 Macrografía sin ataque unión tubo-tapa, en la zona de pérdida de fluido hidráulico. En recuadro rojo, se evidencia la falta de penetración de la soldadura y con flechas verdes se identifica la presencia de una fisura pasante en el metal de soldadura.

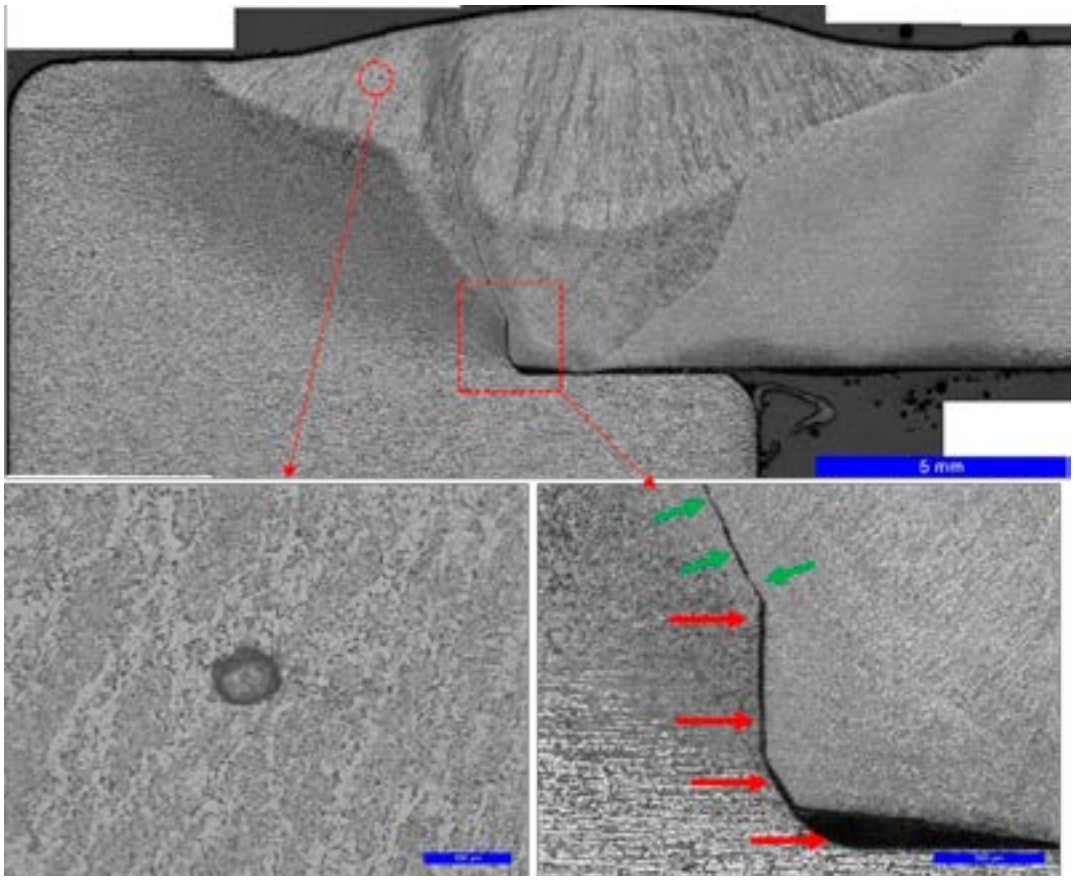


Figura 6 Macrografía con ataque unión tubo-tapa, zona de pérdida de fluido hidráulico. Detalle de presencia de porosidad sobre el metal de soldadura y de falta de penetración sobre la raíz de la soldadura (flechas rojas) y desarrollo de fisura sobre el metal de soldadura (flechas verdes), en correspondencia con la falta de penetración de raíz encontrada.

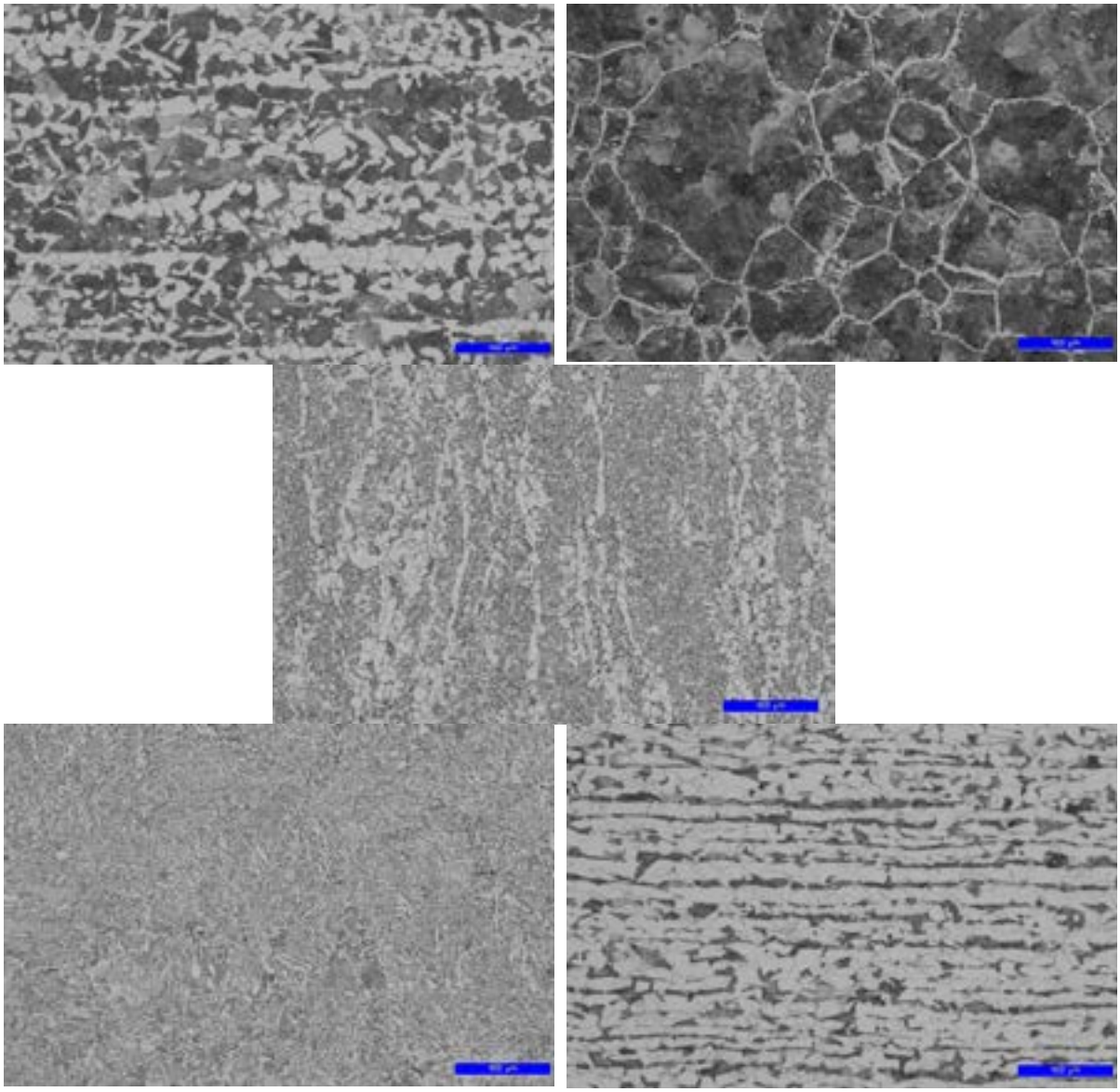


Figura 7 Micrografías de las distintas regiones de la unión soldada: (Sup.) Metal base y ZAC de la tapa; (Centro) Metal de soldadura; (Inf.) ZAC y metal base del tubo.

Tabla 2: Microdureza en cada región de la unión soldada Tapa-Tubo.

Dureza $HV_{0,1}$ ***Promedio***	**Zona**
187 ± 20	TAPA - MB
227 ± 15	TAPA - ZAC
202 ± 13	MS
222 ± 13	TUBO - ZAC
245 ± 13	TUBO - MB

Conclusiones

A partir de los análisis fractográficos y microestructurales, se reveló que la fuga de fluido hidráulico durante el ensayo se debió a la formación de una fisura pasante a través del cordón soldado de la unión tapa-tubo. Esta fisuración tuvo lugar como consecuencia de una falta de penetración en la raíz a lo largo de toda la circunferencia de la junta y presencia de porosidad en el metal de soldadura, dando lugar al desarrollo de fisuras sobre el metal de soldadura desde la raíz de la unión.

Como medidas correctivas, se recomienda antes de soldar limpiar bien los componentes, eliminando posibles restos de grasa, pintura o lubricantes utilizados en el maquinado. Flamear la junta antes de soldar para eliminar presencia de humedad. Verificar la calidad y condición del consumible (alambre tubular) que se utiliza. Verificar el diseño de la junta, y en particular se recomienda dejar separación de raíz. Seleccionar y controlar las variables del proceso, en particular la velocidad de soldadura a efectos de garantizar adecuada penetración en la primera pasada, la longitud libre de alambre (distancia entre el tubo de contacto y la punta del alambre) lo cual incide en la eliminación de humedad que pueda tener el consumible y así minimizar el posible ingreso de hidrogeno difusible en el metal de soldadura.

Bibliografía

[1] ASME sec. II parte C SFA 5.20.
[2] ASM International (2002), ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention.

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN EL ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA POR ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA

Martínez, Ángel J.; Girardi, Joaquín; Kohan, Juliana; Bonvicini, Pablo F.; Urrutipi, Facundo; Echarri, Juan M.; Kang, Kyung Won.

Laboratorio de Investigaciones en Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminsky" (LIMF) – Facultad de Ingeniería – UNLP – CIC PBA
48 y 116, La Plata, Buenos Aires, Argentina
joaquin.martinez@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminsky" (LIMF) cuenta entre su equipamiento con un Espectrómetro de Emisión Óptica Oxford Instruments – Modelo Foundry Master para la realización de ensayos de caracterización química en materiales metálicos (ver Figura 1).



Figura 1. Fotografía del espectrómetro de emisión óptica Oxford Instruments – Foundry Master y sus patrones internos de calibración.

El estudio de los procesos, etapas intermedias y eventos críticos que tienen impacto en la repetibilidad, reproducibilidad y las acciones para optimizar el desempeño global de ensayos de laboratorio se inscriben en las metodologías de aseguramiento de la calidad, la mejora contínua y el análisis basado en riesgo. Lo anterior es fundamental para la confiabilidad y trazabilidad metrológica de los ensayos de caracterización de propiedades en general y en particular en la espectrometría de emisión óptica (EEO – OES su sigla en inglés).

Consideraciones sobre el ensayo, resultados de calidad y toma de decisiones

La espectrometría de emisión óptica es una técnica analítica de alta precisión y sensibilidad utilizada para la caracterización química de materiales metálicos, mediante la medición de la intensidad y longitud de onda de la luz emitida por los átomos o iones excitados. En el contexto industrial y científico, es fundamental asegurar la calidad de los resultados obtenidos en dichos ensayos. El aseguramiento de la calidad en las pruebas químicas no solo implica el control de los equipos y procedimientos, sino también el cumplimiento de normas que regulan la técnica, como la norma ASTM E 415 [1] para el caso de los aceros al carbono, que es fundamental para la práctica de la EEO, con el objetivo de garantizar la precisión, la exactitud y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Aquí se incluye:

a) Control de Instrumentos

El aseguramiento de la calidad comienza con la calibración y el mantenimiento adecuado de los equipos. El espectrómetro de emisión óptica debe ser calibrado utilizando patrones de

referencia certificados, es decir, composiciones conocidas y certificadas. La calibración regular, la verificación del rendimiento y las pruebas de repetibilidad aseguran que los resultados obtenidos sean confiables. Además, el equipo debe someterse a un mantenimiento preventivo para evitar fallas o alteraciones que puedan afectar la precisión de las mediciones.

b) Selección de Muestras y Preparación

La preparación de las muestras juega un papel crucial en la exactitud de los resultados. Las muestras deben ser homogéneas, y su tamaño y forma deben estar adecuados para el análisis. Cualquier variación en la preparación puede introducir errores significativos en la medición de la composición química. Además, las condiciones ambientales deben mantenerse estables durante todo el proceso para minimizar las influencias externas que puedan alterar los resultados, como variaciones en la temperatura y la humedad.

c) Uso de Materiales de Referencia Certificados

El uso de materiales de referencia certificados es indispensable para garantizar la precisión de los resultados obtenidos en el ensayo. Los materiales de referencia deben ser seleccionados con base en su similitud con las muestras que se están analizando. Esto no solo ayuda a validar los resultados, sino también a calibrar y ajustar los equipos para mejorar la precisión en la medición de los elementos químicos presentes.

d) Calibración y Validación del Método

La calibración debe realizarse utilizando patrones de referencia internos para cada elemento a analizar. Esta calibración debe ser periódica y ajustarse según sea necesario para mantener la precisión del equipo. La validación del método, que consiste en comparar los resultados obtenidos con métodos alternativos o materiales de referencia, también es esencial para verificar que el método utilizado sea adecuado para la muestra en cuestión.

e) Control de Calidad y Auditorías

El aseguramiento de la calidad no solo se refiere a las etapas del ensayo, sino también a un sistema de control y auditoría constante para verificar que todos los procesos sean adecuados y consistentes. Esto debe incluir a los procedimientos de control interno que implica la implementación de protocolos para revisar y asegurar que todos los pasos del proceso estén realizados correctamente. Se realizan verificaciones de calidad intermedias, revisión de los resultados obtenidos en cada etapa y la implementación de medidas correctivas cuando sea necesario.

Las auditorías internas ayudan a garantizar que los métodos y los resultados cumplan con las normas de referencia de esta técnica de caracterización. Estas auditorías incluyen la verificación del cumplimiento del procedimiento de ensayo atento a las normas ASTM y/o equivalentes, la revisión de registros de calibración y el análisis de informes de resultados. A través del plan de capacitación se logra a su vez que todos los analistas que utilicen este método de ensayo, sean capaces de realizar procedimientos de laboratorio comunes con habilidad y seguridad. La norma ISO 17025 sobre “Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración” [2], establece que los laboratorios deben participar en ensayos de aptitud o estudios interlaboratorios pertinentes, siendo fundamental para verificar y mejorar la calidad de los resultados.

Técnica, equipamiento y periféricos.

El equipo de espectrometría óptica tiene tres componentes principales: Fuente eléctrica de alto voltaje, un sistema óptico y un software de análisis. Con esta técnica podemos analizar la composición elemental para muestras metálicas sólidas, cubriendo un amplio rango de concentración de los mismos en base a grados estándar, patrones y materiales de regencia certificados. Se debe excitar los átomos de la muestra metálica a los efectos de lograr una emisión óptica. Se utiliza la fuente eléctrica de alto voltaje, a través de un electrodo. La diferencia de potencial entre el electrodo y la muestra produce la descarga eléctrica. Esta descarga eléctrica ocasiona el calentamiento y la evaporación del material en la superficie y excita los átomos del material que luego irradia un haz de emisión característico. El sistema óptico del equipo detecta el haz de emisión múltiple de parte de la muestra evaporada. Una rejilla de difracción separa el haz que ingresa al espectrómetro en sus respectivas longitudes de onda y un detector mide el nivel de intensidad para cada elemento. Los picos de las

longitudes de onda determinan los elementos y el área bajo los picos o su intensidad nos da una indicación de su cantidad en la muestra. El nivel de intensidad es proporcional al porcentaje de concentración de cada elemento de la muestra [3].
El software de análisis adquiere los niveles de intensidades medidas y los procesa de acuerdo con una calibración pre-definida (ver Figura 2).

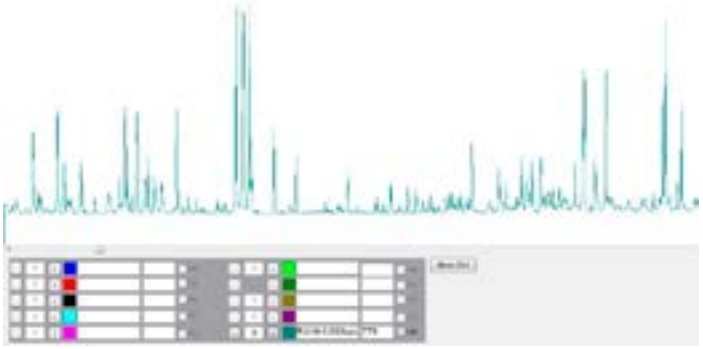


Figura 2 Espectro de caracterización de patrón interno

Este método de ensayo cubre el análisis de muestras que tienen un diámetro adecuado obturando y sellando la abertura de la cavidad del portaelectrodo o soporte de la descarga por chispa (ver Figura 3). El espesor mínimo de la muestra a ensayar debe ser de entre 1 y 1,5 mm, dependiendo de la aleación (evitando la perforación de la muestra) hasta los 50 mm que es lo que se dispone en portamuestra para lograr la continuidad eléctrica como recomendable máximo.



Figura 3 (*Izq.)*Espectrómetro de emisión óptica Oxford Instruments-Foundry Master.
*(Der.)*Detalle porta muestra y abertura cavidad porta electrodo.

La absorción de la radiación por el aire en esta región se supera evacuando la cavidad del porta electrodo para lo que se requiere una atmósfera de argón de alta pureza en la brecha analítica, insumo crítico del proceso. El depósito que se acumula en la punta del electrodo, si no se elimina, puede reducir la intensidad general de la radiación espectral o transferir pequeñas cantidades de contaminación entre las muestras, o ambas cosas. La acción de limpieza de cámara de chispa debe establecerse regularmente.
Los materiales de referencia certificados se utilizan para calibrar el espectrómetro para los elementos de interés o para validar el rendimiento del método de prueba (ver Figura 4).



Figura 4 *(Izq.)* Certificados de Materiales de Referencia *(Der.)* Materiales de referencia certificados

Los Materiales de Referencia se utilizan típicamente en procedimientos de control y en la corrección de deriva del espectrómetro, y pueden ser útiles en calibraciones. Estos materiales de referencia deben ser homogéneos y contener fracciones de masa apropiadas de cada elemento para el propósito previsto. Las muestras a ensayar pueden mostrar diferencias en la estructura metalúrgica, en particular, presentar segregación, tratamientos superficiales, descarburación, recubrimientos, y presencia de inclusiones. La distribución inhomogénea de estos rasgos puede empeorar la repetibilidad de mediciones individuales de ciertos elementos. Todo lo anterior constituye posibles efectos de desviación a tener en cuenta en la recepción y especificación del tipo de análisis (recubrimiento o material base), entre otros factores a considerar dentro de las matrices de riesgo.
Tanto las muestras como los materiales de referencia deberán acondicionarse de la misma manera y acorde a los procedimientos indicados por el fabricante y el método de ensayo. La porosidad de la muestra es indeseable porque conduce a una descarga "tipo difusa" incorrecta, en lugar de la descarga "tipo concentrada" deseada.
Una vez que se han tomado todas las medidas para asegurar la calidad en el proceso, los resultados obtenidos a partir de los ensayos deben ser evaluados en función de la consistencia y exactitud. Los informes de resultados deben ser claros y detallados, e incluir información sobre el procedimiento utilizado, las condiciones del ensayo, los materiales de referencia empleados y cualquier desviación o anomalía detectada. Estos informes son cruciales para la toma de decisiones en industrias como la fabricación de componentes metálicos, la construcción, y la investigación.

Implementación de ISO/IEC 17025 en el marco del ensayo de EEO.

Dentro de las acciones para la implementación de la norma ISO/IEC se destacan el desarrollo de un plan de mantenimiento que asegure la repetibilidad y fiabilidad de los resultados, un plan de capacitación para los analistas, empleo de herramientas dentro del SGC (tipo matriz SIPOC, análisis FODA, PESTAL, para análisis de riesgo y oportunidades), matrices de roles y responsabilidades, control de insumos y auditorías internas e interlaboratorios. A continuación y a modo de ejemplo se vuelca el desarrollo del SIPOC (tabla 1).

Tabla 1. Herramienta SIPOC.

1.Gestion del Sector				
1.1 Atención al cliente				
Cliente	Correo electrónico con consulta del cliente. Antecedentes del comitente.	Instructivo: Gestión del Sector; Atención al cliente.	Asignación del trabajo, coordinación de entrega de muestras y dudas del cliente resueltas.	Servicio de espectrometría
1.2 Recepción de muestras				
Cliente	Muestras, elementos de codificación, servidores de gestión (drive).	Instructivo: Gestión del Sector; recepción de muestras	Muestra ingresada al SGC con planilla de recepción de muestra.	Analista
1.3 Seguimiento de Personal Capacitado				
Responsable de Capacitación del	Plan de capacitación del personal	Instructivo: Gestión del Sector; Seguimiento del personal capacitado	Planilla de seguimiento de capacitación actualizado y documentación.	Servicio de espectrometría
1.4 Control de Inventario e Insumos				
Compras LIMF y su cartera de proveedores	Argón: argón para espectrometría, 99,998 % – 99,999 % Ar. Electrodos: electrodo tungsteno d6.15 x 56 mm (Uno por cada tipo de familia de aleaciones del cual el equipo esta calibrado). PC, Herramental complementario: Lijas de alúmina mesh 60, Lijas de SiC mesh 60, Cepillo de limpieza , Cepillo de limpieza metálico (para cada electrodo), Llave de ajuste de electrodo, Dispersor de aire, Bomba: Edwards RV3 Rotary Vane Vacuum Pumps, Patrones internos para cada familia de aleaciones, Patrones primarios para cada familia de aleaciones.	Instructivo: Gestión del Sector; Control de Inventario e Insumos	Informe de inventario completo y actualizado.	Servicio de espectrometría
2.Mantenimiento Regular				
Analista	Kit de limpieza y mantenimiento	Instructivo: Gestión del Sector; Mantenimiento Interno	Correcto funcionamiento del equipo	Servicio de espectrometría
3.Preparacion de muestras				
Responsable sector	Muestras del cliente con información relevante a la misma	Instructivo: Preparación de muestras	Muestras en condiciones para ensayar	Analista

4.Calibración con patrones internos y verificación con patrones primarios				
Mess; Servicio de espectrometría	Patrones primarios del Laboratorio con sus hojas de composición quimica; Patrones Internos del equipo; Periféricos en condiciones (Argon, cubeta de desechos, nivel de aceite de la bomba); Electrodos de W y lijas propios de cada material a calibrar; kit de limpieza.	Instructivo: Recalibración del espectrometro de chispa Oxford	Equipo de espectrometría calibrado para la familia de aleaciones pertinente	Servicio de espectrometría
5.Ensayo de espectrometría				
Responsable de Gestión del Sector	Muestras en condiciones para ensayar; lijas y filamento de W correspondientes al material, periféricos en condiciones. Norma E3047 − 16	Instructivo: Operación del espectrometro de chispa Oxford	Muestras almacenadas y ensayadas	Responsable de liberación de informe
6.Elaboracion de Informe				
Responsable de liberación de informe	Códigos y normativa de referencia; datos de espectro	Completar informe según formato genérico INFORME ESPECTROMETRIA	Informe de trabajo con composición quimica de las muestras	Cliente

Conclusiones

Las técnicas de monitoreo de calidad basadas en la aplicación de procedimientos de ensayo que incluyen la calibración regular del espectrómetro de emisión óptica Oxford Instruments – Foundry Master utilizando patrones internos y de referencia certificados, aseguran la alineación de los resultados con estándares reconocidos. La planificación y revisión periódica de estas actividades permiten mantener la integridad y validez de los ensayos realizados. La combinación de buenas prácticas de laboratorio con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025 garantizan la fiabilidad y exactitud de los resultados de los ensayos de caracterización química por esta técnica analítica. El empleo de las herramientas de tipo SIPOC han sido de gran ayuda para las capacitaciones de los analistas y vuelca una perspectiva clara y completa del proceso.

Referencias

[1] American Society of Testing and Materials – ASTM E415-21 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.
[2] Organización Internacional de Normalización (ISO). (2017). *ISO/IEC 17025: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración* (3.ª ed.). ISO.
[3] American Society for Metals. (1990). *Optical emission spectroscopy*. In *Metal handbook* (Vol. 10, pp. 427-464). ASM International.

CREACIÓN Y ADAPTACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA INCLUSIÓN EDUCATIVA

Sánchez, María Belén[(a)]; De la Cuadra, Guadalupe [(a)], Kohan, Juliana I.[(a)], Urrutipi, Facundo[(a)]; Echarri, Juan Manuel[(a)], Culcasi, J. Daniel[(a)]; Rocío Alzamendi[(b)], Graciela Ybarra[(b)].

[a]Carrera de Ingeniería en Materiales - Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería; [b]Sistema de Información Integrado. Biblioteca Julio R. Castiñeiras. Servicio de Circulación y Desarrollo de Colecciones. Área Accesibilidad UNLP, 1 y 47, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar

Introducción

El trabajo que se comparte a continuación se enmarca en la categoría de "mejoramiento en la enseñanza y el aprendizaje", y es fundamentalmente colectivo e inclusivo, surgió a partir de la mera necesidad de cubrir un déficit de inclusión educativa y con mecanismos que se activaron de forma natural dentro de la institución. En términos técnicos, podríamos decir que este trabajo surge a partir de la observación de las posibilidades (y dificultades) de vincularse en el ámbito de la enseñanza, cuando las y los interlocutores se encuentran por primera vez frente a un escenario distinto y con una complejidad objetiva (inclusión de personas con ceguera total o parcial), donde la transferencia en el plano visual concreto ("imagen") se obstaculiza por la falta de material táctil 3D que facilite la abstracción y fomente la imaginación, habilitando y potenciando la enseñanza-aprendizaje. Desde la necesidad de adaptación de material bibliográfico y didáctico, surgieron acciones que se enmarcaron formalmente en el ámbito del mejoramiento de la enseñanza en las áreas de Metalurgia Física, dentro de las asignaturas de "Fundamentos del Comportamiento de los Materiales". Parte del material desarrollado se vuelca en las figuras 1, 2 y 3, y se destaca la condición de relieve que al tacto permite distinguir los rasgos fundamentales para comprender los mecanismos de deformación y endurecimiento actuantes, así como los rasgos microestructurales, sistemas cristalinos, planos compactos, visualización de defectos y otros tantos elementos de la física de materiales que explican las propiedades o el desempeño de sistemas de aleaciones.

1. Relevancia y objetivos

La discapacidad visual se define como la dificultad que presentan algunas personas para participar en actividades propias de la vida cotidiana, que surge como consecuencia de la interacción entre una dificultad específica relacionada con una disminución o pérdida de las funciones visuales y las barreras presentes en el contexto en que se desenvuelve la persona"[1]. Trasladado al ámbito de formación académica, esta dificultad se acentúa en función de que las instituciones transitan una diversidad de (dis)capacidades frente a estos escenarios. A la carrera de Ingeniería en Materiales han ingresado estudiantes que impulsan desde lo propio, por la condición de discapacidad que subyace, acciones que tienden a mitigar las dificultades y las barreras entre la enseñanza y el aprendizaje, a la vez que actores dentro de la institución (Estudiantes, Docentes y Nodocentes) se organizan y contribuyen en el mismo sentido dando lugar a una solución conjunta. Sobre esta idea última, quién comparte autoría y fue impulsora y partícipe, la Srta María Belén Sanchez con disminución severa de capacidad visual (más de un 90% de pérdida de visión), nos hizo repensar (sin ser especialistas en inclusión educativa) el término discapacidad toda vez que demostró capacidades sobre-humanas, fortalezas y una determinación de un valor que debe apreciarse y aprenderse para afrontar los desafíos propios de estas dificultades objetivas. Al mismo tiempo el equipo de biblioteca o Sistema de Información Integrado de Facultad de Ingeniería (de aquí en más SII-FI), desde el momento cero, alertó de la necesidad de avanzar con la adaptación de material bibliográfico, apuntes y diapositivas a un marco que sea favorable a la condición de Belén. En ese sentido el equipo del SII-FI, tutorías y el Dto de Materiales (coordinando con sus docentes y junto a la estudiante que se encontraba desempeñando la beca de extensión) formaron una mesa de trabajo para

avanzar en algunos puntos comunes. De aquí surgen los objetivos planteados en el presente trabajo:

1. Adaptación de material de lectura, bilibografía, apuntes y presentaciones de clase para una lectura “texto a voz” eficiente y con un lenguaje técnico propio de las asignaturas de interés.
2. Creación de material didáctico que favorezca el uso de las capacidades táctiles para la comprensión de conceptos abstractos nano, micro y macroestructurales que forman parte del paradigma estructura, desempeño, procesamiento y propiedades de los materiales.
3. Adaptación de un aula que presenta condiciones desfavorables de ecos y reverberaciones que dificultan a la estudiante valerse de la capacidad auditiva para la mejor comprensión de los conceptos que se dificultan por la vía visual.

2. Desarrollo

2.1. Adaptación de material de lectura.

Luego de un pedido formal por parte del equipo del SII-FI se actualizaron apuntes, diapositivas y material bibliográfico con el fin de que biblioteca cuente con las últimas versiones y repositorios actualizados para adaptar de texto a voz todo lo que Belén pueda emplear para desempeñarse como estudiante reforzando las capacidades tanto de la institución como el nivel de presencia y conciencia de los actores que forman parte de la misma. En este sentido se digitalizaron capítulos, separatas, apuntes y libros, así como clases o diapositivas y fueron adaptadas para la herramienta texto a voz. Se mencionan algunos de ellos que más allá de la situación concreta de Belén dejan a la carrera de Ingeniería en Materiales en una situación de mayor nivel de inclusión a la que se encontraba previo al ingreso de la estudiante, el material adaptado a saber:

Callister, W. D. Jr. (2010). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Reverté.
Reed-Hill, R. E. (2009). *Physical Metallurgy Principles (Fourth Edition).* Cengage Learning.
Verhoeven, J. D. (2000). *Fundamentos de Metalurgia Física.* Waveland Press.
ASM International. (2005). *ASM Metals Handbook, Volume 3 – Alloy Phase Diagrams.* ASM International.
Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy* (3rd ed.). McGraw-Hill.
ASM International. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International.
William F. Smith - Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
Apunte de cátedra: Recocido de recristalizacion-Recuperacion, recristalizacion y crecimiento de grano. “Fundamentos del Comportamiento de los Materiales II” - Dto de Materiales – FI:
Apunte de cátedra: Fundamentos Del Creep, “Fundamentos del Comportamiento de los Materiales II” - Dto de Materiales – FI.

2.2. Creación de Material didáctico.

La estudiante becaria de extensión por el Dto. De Materiales, Sta. Guadalupe de la Cuadra, se puso a disposición de la mesa de trabajo en las tres áreas u objetivos presentados en la actual divulgación. Particularmente, y debido al manejo de la impresión 3D y en una sana integración de su visión con perspectiva de la especialidad, compiló junto con el equipo de trabajo una serie de figuras, cuerpos y diagramas que adaptó para el formato 3D y finalmente imprimió, formando un espacio didáctico que le facilitó a Belén la comprensión de fenómenos y conceptos claves enmarcados en la Metalurgia Física dentro de las asignaturas “Fundamentos del comportamiento de los Materiales I” y “Fundamentos del Comportamiento de los Materiales II” a saber: Definición de celda unidad, concepto de planos compactos o de baja densidad atómica planar, concepto de coherencia/incoherencia/semicoherencia de precipitado, visualización de defectos puntuales, de línea y de volumen en una red cristalina. Estructuras presentes en los diversos modos de crecimiento de grano en la solidificación de metales, índices de Miller y diagramas de fase, entre otros.

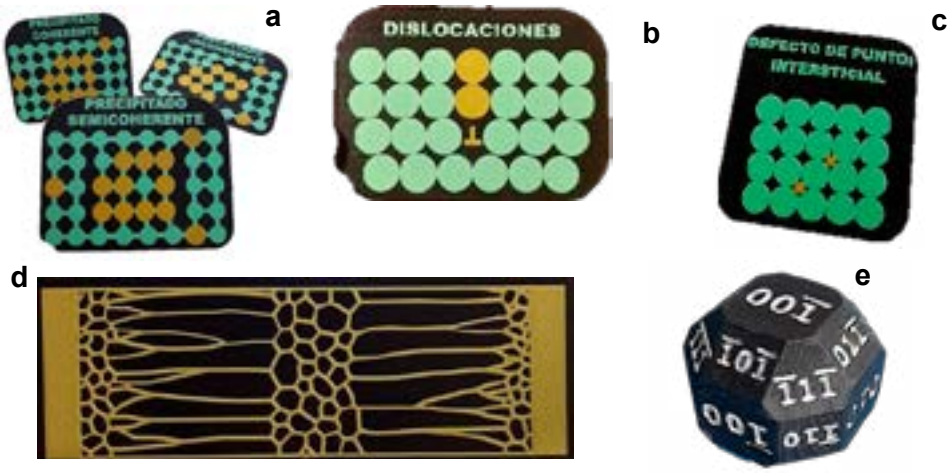


Fig. 1. Impresión 3D para las formas de (a) condición de arreglo de precipitados según categorías de tipo de interfaz, (b) dislocación de bode, (c) tipos de defectos y/o soluciones sólidas presentes en un metal/aleación, (d) zonas características en la estructura de solidificación y planos cristalográficos en índices de Miller (e).



Fig. 2. Impresión 3D para las formas de (a) modo de solidificación dendrítica con brazos 1° y 2°, (b) celda unitaria FCC y (c) celda unitaria BCC, con solutos sustitucionales.

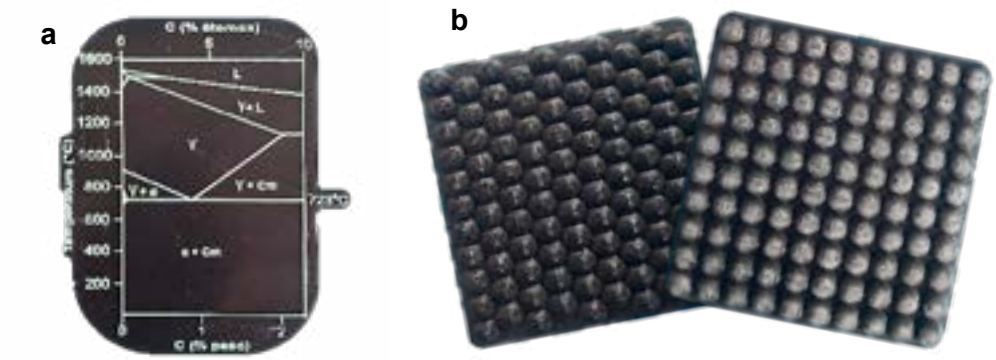


Fig. 3. Impresión 3D para las formas de (a) diagrama de fases binario Fe-C en la zona de interés de A° al C (b) formas de ordenamiento atómico para los planos de estructuras compactas y no compactas en modelo simplificado de esferas.

2.3. Acustización de las aulas.

El desarrollo de las clases dónde la estudiante co-autora se vale de su nivel audición para el seguimiento de la temática no fue óptimo debido a un efecto de ecos y reverberaciones del espacio. Dicho efecto, estudiado y caracterizado con la colaboración de la facultad de Artes – “Cátedra de Acústica Musical”, y a la participación de su prof. Titular Dr. Ing. Gustavo Basso,

se presenta tanto en el Aula 46 como en el Aula 1. Por costos y posibilidades operativas se eligió esta última de menor tamaño pero que cumple con el factor ocupacional para la mayoría de los cursos de años avanzados de la carrera. El estudio realizado por la cátedra citada recomendó la instalación de 15 paneles de $1m^2$ a una distancia (colgantes) a 1 metro aproximadamente del techo del aula y espaciados entre sí según especificaron los especialistas en acústica. Debido a los costos de estos materiales, con la coordinación de la becaria de extensión y la colaboración de estudiantes y becarias/os de la carrera, se fabricaron los paneles en base a soportes de madera tipo mdf y poliuretano para acústica. El trabajo quedó terminado, restando para la culminación del proyecto la instalación de los paneles en el aula.

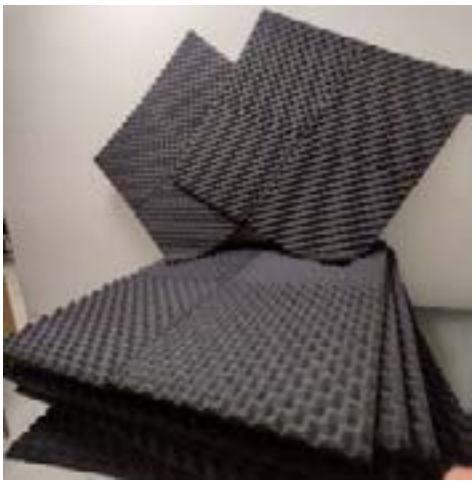


Fig. 4. Paneles construidos desde el espacio de extensión del Dto. De Materiales con el trabajo de estudiantes de la carrera.

En este mismo sentido la estudiante becaria de extensión en el transcurso de la EXPO UNLP 2023 se acercó al stand de la Comisión Universitaria de Discapacidad, y luego de conversar sobre los proyectos en curso alrededor de la temática y las ideas a futuro respecto a la acustización de aulas, nos invitaron a participar de la reunión mensual de octubre del 2023. En dicha reunión se trataron diversos temas sobre políticas y prácticas académicas sobre la accesibilidad de algunas Facultades, donde la becaria tuvo lugar para contar la situación particular de la estudiante de ingeniería de Materiales, y cual fue el acompañamiento que como Facultad se llevó adelante así como los proyectos en curso para mejorar el nivel de inclusión. La comisión recibió la experiencia muy atenta y con total predisposición a apoyar los proyectos de la manera en que sea necesario, y consideró que sería muy útil que se participe en la Semana de la Discapacidad y los Derechos Humanos, organizada por la UNLP, para que principalmente, mostremos a la comunidad cuán valioso es el recurso de impresión 3D ante capacidades limitadas en alumnxs, y la trayectoria que hemos recorrido.

3. Conclusiones

El trabajo realizado tuvo un impacto positivo en aspectos fundamentales:

- Se desarrolló desde un abordaje temprano desde la institución y a partir de la iniciativa del Sistema de Información Integrado para adaptar material de estudio en perspectiva de inclusión para una estudiante con diminución severa de capacidad visual y continuó con el trabajo conjunto del Dto. De Materiales a través de la dirección ejecutiva, el área de extensión (con la participación de la becaria del área), docentes de la carrera, estudiantes y tutorías, en conjunto con el aporte siempre invaluable del equipo de trabajo del SII-FI.

- Se fortaleció la Facultad y la Carrera de Ingeniería en Materiales en materia de inclusión al verse fomentados estos espacios de trabajo interclaustro e inter departamental en clave de mejoramiento de la enseñanza/aprendizaje.
- Se gestó el desarrollo de un área dentro del Dto. De Materiales, que más allá de cubrir un déficit en materia de inclusión en el aprendizaje, favorece los procesos de enseñanza/aprendizaje, con el uso de material creado a través de impresión 3D con los que se abordan conceptos usualmente abstractos, dónde uno de los exponente es la visualización de la diferencia en el esfuerzo cortante resuelto en estructuras FCC vs BCC o HCP.
- Se avanzó en la acustización de una de las aulas más usadas por la carrera de Ing. En Materiales y que se encuentra a disposición de la comunidad, siendo requerida entre otros actores, frecuentemente por las agrupaciones estudiantiles y espacios de tutorías para dar apoyo en asignaturas de los primeros años.

Referencias

[1] Pérez Ruiz y Corvalán Vega, 2007.
[2] Ministro de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación. (2019). *Educación inclusiva: Fundamentos y prácticas para la inclusión*. Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación.
[3] Mitchell, D. (2014). *What Really Works in Special and Inclusive Education: Using Evidence-Based Teaching Strategies* (2nd ed.). Routledge.

CÁNICA**MECÁNICA**MECÁN

MIRADA DE LAS PRACTICAS PROFESIONALES SUPERVISADAS EN EL DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Ana Laura Cozzarín

Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

Email: acozzarin@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Es objetivo del presente trabajo realizar una evaluación de las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS) del Departamento de Mecánica desde Septiembre de 2022 hasta el mismo mes del año 2024 y pretende colaborar en sistematizar y difundir, según las voces de estudiantes y supervisores a través de ejemplos concretos, escenarios formativos potentes que promuevan la formación práctica. En el Departamento se encuentran insertas las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electromecánica y en el transcurso del tiempo mencionado se han efectuado en total 101 PPS, siendo 34 de Electromecánica y 67 de Mecánica. Los espacios de prácticas profesionales - de reciente incorporación en algunas de las carreras declaradas de “interés público” y acreditadas en el marco del artículo 43 de la Ley de Educación Superior (24521), y con inclusión diversa y de larga data en otras carreras- tienen la intención de incluir en la formación el repertorio de estrategias de intervención y habilidades técnicas requeridas en el desarrollo de tareas profesionales; pero también involucran la internalización de usos y costumbres derivadas de las "culturas de trabajo" propias de los contextos de desempeño. En los planes de estudio de las carreras mencionadas desde el plan 2002 se encuentran como obligatorias para obtener el título de grado y es debido a que se encuentran altamente ligadas a los contextos es que se desea analizar los diferentes entornos que atraviesan los alumnos y alumnas del Departamento al efectuar sus prácticas. En referencia al lugar donde desarrollan las actividades los estudiantes, casi el 30% lo hace en una gran empresa (cantidad de empleados mayor a 300), casi el 18% las realiza en una PyMe (entre 50 y 300 empleados), cercano al 10% de los estudiantes realizan sus actividades en pequeñas PyME (menos de 50 empleados), cercano al 35% realizan sus prácticas en dependencias de la Universidad y el resto en entidades públicas de nivel provincial o nacional. Una vez finalizada la actividad algunos de los estudiantes expresan haber efectuado sus tareas en distintos lugares de las instituciones mientras otros han desarrollado las 200 horas de práctica en el mismo lugar; más del 50% de los estudiantes han expresado trabajar en el área mantenimiento durante su práctica y casi el 50% ha trabajado en el área de Ingeniería, también han participado del área fabricación (25 %), área técnica (22%) y área calidad (10%). Un porcentaje superior al 50% continúan trabajando en donde realizaron su PPS. La mirada de los supervisores indica, entre otras cosas, que la formación teórica es muy buena y sería deseable poder profundizar conceptos de inglés técnico, manejo de herramientas,

hacer hincapié en el manejo de documentación técnica, y mejorar la comunicación oral y escrita. Por otro lado, los estudiantes visualizan la PPS como una gran posibilidad de aprender “en campo” las actividades vistas de manera teórica en las aulas y aquellos que han realizado actividades vinculadas al área social agradecen les haya tocado este tipo de práctica ya que en el transcurso de la carrera no han visto nada de esta característica.

INTRODUCCIÓN

Las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electromecánica desde el plan 2002 tienen incorporadas en sus planes de estudio las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS), las cuales tienen como objetivo que los y las estudiantes de Ingeniería electromecánica o mecánica se inicien en Prácticas Profesionales de la Ingeniería en campo, entendiendo que la Práctica de la Ingeniería puede comprender el estudio de factibilidad técnico económica, investigación, desarrollo e innovación, diseño, proyecto, modelación, construcción, pruebas, optimización, evaluación, gerenciamiento, dirección y operación de todo tipo de componentes, equipos, máquinas, instalaciones, edificios, obras civiles, sistemas y procesos. Las cuestiones relativas a la seguridad y la preservación del medio ambiente constituyen aspectos fundamentales que la práctica de la ingeniería también debe observar.

En el presente trabajo se pretende mostrar empíricamente lo ocurrido en dos años en lo referente a las PPS del Departamento de Mecánica, debido a que las prácticas se encuentran altamente ligadas a los contextos donde se desarrollan es que se desea analizar los diferentes entornos que atraviesan los alumnos y alumnas del Departamento al efectuarlas. Las voces más preponderantes serán de los y las estudiantes que realizaron la actividad en ese transcurso y de los supervisores que trabajaron a diario con ellos. La actividad se inicia cuando los estudiantes están avanzados en la carrera, ellos deben realizar un informe luego de haber trascurrido las 200 horas de PPS en el lugar de trabajo seleccionado para la actividad y luego de la corrección del informe por parte de la Dirección de Carrera se entra en contacto con quien supervisó al estudiante para que realice una evaluación del desempeño y proponga, si lo desea, observaciones a la Dirección para ser tenidas en cuentas a futuro.

LAS PPS DEL DEPARTAMENTO EN NÚMEROS

En el Departamento de Mecánica actualmente se encuentran insertas las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electromecánica. Entre Septiembre de 2022 y el mismo mes de 2024 se han efectuado un total de 101 PPS, siendo 34 de Electromecánica (33.7%) y 67 de Mecánica (66.3%). En los planes de estudio tanto en el plan 2002 como en el 2018 se encuentran como obligatorias para obtener el título de grado, el 68% de las PPS realizadas en el período (69) corresponden al plan 2002, con condición de aprobación de 33 materias para el caso de mecánica y 34 asignaturas para electromecánica, mientras que las restantes prácticas (32) son de los nuevos planes de estudio (2018).

En referencia al lugar donde desarrollaron las actividades los estudiantes, casi el 30% lo hizo en una gran empresa (cantidad de empleados mayor a 300), casi el 18% las realiza en una PyMe (entre 50 y 300 empleados), cercano al 10% de los estudiantes realizaron sus actividades en

pequeñas PyME (menos de 50 empleados), cercano al 35% realizaron sus prácticas en dependencias de la Universidad y el resto en entidades públicas de nivel provincial o nacional.

Una vez finalizada la actividad algunos de los estudiantes expresaron haber efectuado sus tareas en distintas áreas de los establecimientos mientras otros han desarrollado las 200 horas de práctica en el mismo lugar; más del 50% de los estudiantes han expresado trabajar en el área mantenimiento durante al menos un período de su práctica y casi el 50% ha trabajado en algún momento en el área de Ingeniería, también han participado del área fabricación (25 %), área técnica (22%) y área calidad (10%). Un porcentaje superior al 50% al finalizar su PPS continuaron trabajando en la donde realizaron la actividad, estos casos son en lugares de cercanía a la Facultad y/o los estudiantes están muy próximos a graduarse o sólo adeudan el Trabajo final (plan 2002 que es obligatorio el Trabajo Final o la equivalencia por el año de trabajo).

MIRADA DE LAS PPS POR PARTE DE LOS ESTUDIANTES

La mirada que presentan los alumnos o alumnas que efectúan su PPS es muy diversa debido a la gran variedad de lugares donde las realizan y a que las experiencias realizadas se encuentran altamente ligadas a los contextos que atraviesan durante las 200 horas. Se pueden mencionar a modo de ejemplo, entre otros, el caso de Matías que realizó su actividad en la empresa Metalúrgica Hermann S.R.L. de Gualeguaychú donde su tarea principal fue realizar un estudio y desarrollar un informe técnico sobre los robots de soldadura para buscar optimizarlos o a Eugenia, quien participó como apoyo para la certificación de calidad del proceso productivo y el producto final realizado en el programa “Qunita Bonaerense”, el cual se lleva a cabo por personas privadas de su libertad en la Unidad de Encausados N°1 de Olmos, o Federico quien para el Club Estudiantes de La Plata, más específicamente en el estadio UNO, en el marco del proyecto de mejora del sistema de la gestión de acceso al estadio trabajó en el área mecánica en reforzar y mejorar un molinete, usando uno fuera de uso como prototipo, y luego el escalado del procedimiento de mejora al resto de molinetes del estadio en función de sus resultados, o Lucas quien trabajó en la automatización de la dosificación de ácido en piletas de decapado de la Planta de Ternium en Ensenada.

En sus informes entregados, en lo referente al nivel técnico que tenían al efectuar su PPS, todos hacen mención a la calidad de lo aprendido durante el transcurso de sus estudios en la Facultad de Ingeniería. Hacen muchas conclusiones técnicas desde de la actividad concreta que desarrollaron en las 200 horas y luego hacen conclusiones a nivel personal de aquellos que sienten que les dejó el transitar las 200 horas en aquella actividad. Algunos de los estudiantes hacen mención al orgullo que sintieron al poder aportar soluciones en lugares donde las necesitaban y otros, en cambio, hablan de la limitación que les pusieron en las empresas a expresar sus ideas por ser estudiantes aún universitarios. Muchos estudiantes cierran sus informes finales con agradecimientos, tanto a los lugares donde realizaron sus Prácticas profesionales como a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Pública que les dio la formación para poder desempeñarse de manera correcta en las instituciones.

Quienes han participado de proyectos con aspectos sociales agradecen el haber sido parte de ellos ya que creen que durante la PPS han desarrollado aspectos (técnico-sociales) que no los habían desarrollado durante su formación académica.

Todos, en mayor o menor medido, resaltan el aprendizaje significativo adquirido y la importancia de haber realizado la PPS. Más de la mitad de los estudiantes, una vez finalizada la PPS, quedan, de manera permanente, trabajando en los lugares donde efectuaron su PPS.

MIRADA DE LAS PPS POR PARTE DE LOS SUPERVISORES

Los supervisores, que son quienes dirigen y acompañan a los estudiantes en la tarea diaria, evalúan los desempeños de los estudiantes que efectúan la PPS y si lo desean pueden hacer sugerencias a la Dirección de carrera para aportar visiones para el mejoramiento en la formación de los graduados de ingeniería mecánica y electromecánica.

Al ser encuestados los supervisores sobre si el o la pasante ha cumplido con el horario pautado de la actividad el 100 % afirma que sí, todos informan que los estudiantes han tenido una buena relación con las personas que debían trabajar, que han tenido un buen uso de los recursos teóricos para la resolución de problemas, y frente a las posibilidades de elegir entre las opciones Buena/Regular/Mala todos han elegido la opción de Buena para la iniciativa personal demostrada por el/la estudiante en transcurso de su Práctica Profesional. Sólo un supervisor indico que el estudiante avanzado NO ha utilizado y ha hecho utilizar a quienes están alrededor los elementos de seguridad personal que corresponden.

Con respecto a las falencias que presentaban los estudiantes en su desempeño algunos supervisores han indicado que tenían falencias (podían indicar nula, leve, regular, alta o no aplica) en interpretación de planos, en tecnologías de fabricación, en seguridad e higiene, en idioma inglés y conocimiento de herramental y máquinas; siendo siempre en porcentual la opción elegida de falencia frente a nula/no aplica.

En el espacio propuesto para que los supervisores expresen, si lo desean, observaciones para el mejoramiento de la actividad académica en el Departamento de Mecánica han indicado, entre otras “El ing electromecánico debe tener mayor conocimiento en máquinas eléctricas y electrónica” (cometario de supervisión de gran empresa), “La persona que cursa podría tomar contacto con el área de especialidad con más anticipación, y así poder aprovechar mejor el tiempo determinado para la práctica”. (comentario de supervisión de mediana empresa), “Agregar ingles técnico como materia” (de gran empresa), “A pesar de su inexperiencia inicial en soldadura y manejo de herramientas, el pasante demostró una notable capacidad de aprendizaje, adquiriendo rápidamente las técnicas y destrezas necesarias. Su nivel académico y su ingenio han superado nuestras expectativas” (comentario de gran empresa).

En referencia a las propuestas de temáticas a desarrollar en la Facultad (pregunta no obligatoria), un grupo de supervisores han indicado que no falta ningún contenido a abordar, mientras que otros han nombrado temáticas, como ser: “Reforzar en la UNLP conceptos de máquinas eléctricas, posibilidad de uso de programas como Power BI” (comentario de gran empresa), Tecnologías 4.0 (comentario de supervisión de institución estatal), Introducción a códigos de diseño ASME B31 / VIII (de gran empresa), “Consultado al pasante sobre su conocimiento en un área específica como "Rodamientos" comentó no tener experiencia teórica en el área. Seguramente podrá haber otros temas importantes, pero me pareció extraño que la carrera no avance sobre un tema tan importante como este” (mediana empresa), Práctica de soldadura y

manejo de herramientas de corte (gran empresa), Utilización de herramientas de negocio como Power BI, generación paretos, gráficos en Excel, etc. (mediana empresa).

COMETARIOS DE LA DIRECTORA DE CARRERA

La Práctica de la Ingeniería comprende el estudio de factibilidad técnico-económica, investigación, desarrollo e innovación, diseño, proyecto, modelación, construcción, pruebas, optimización, evaluación, gerenciamiento, dirección y operación de todo tipo de componentes, equipos, máquinas, instalaciones, edificios, obras civiles, sistemas y procesos. Las cuestiones relativas a la seguridad y la preservación del medio ambiente constituyen aspectos fundamentales que la práctica de la ingeniería debe observar [1].

Los espacios de prácticas profesionales tienen la intención de incluir en la formación el repertorio de estrategias de intervención y habilidades técnicas requeridas en el desarrollo de tareas profesionales; pero también involucran la internalización de usos y costumbres derivadas de las "culturas de trabajo" propias de los contextos de desempeño. Los alumnos y alumnas que transitan las Prácticas Profesionales Supervisadas se encuentran próximos a graduarse y es por ello que se espera que al finalizar la práctica hayan incorporado aquellos aprendizajes que faltaban para su desarrollo profesional.

En referencia a los pedidos de temáticas a agregar en los estudios se debe de discutir en la comisión de carrera si es necesario o no ese contenido, sabiendo que no todo lo que soliciten los supervisores será necesario para la general de los estudiantes dado que algunos pedidos pueden ser estudios específicos para alguna industria particular o pertenecer a estudios de posgrado, y quizás puedan ser incorporados en materias optativas.

Los capacidades o habilidades denominadas “blandas” parecen ser las más reconocidas como aprendizajes de los espacios transitados por los estudiantes en la PPS, reconociendo que a lo largo de la carrera han desarrollado poco de las mismas. Ejemplos de ello podrían ser los comentarios de quienes trabajaron en el Programa Qunita donde entre otras cosas expresan: “Creo llevarme un gran aprendizaje, que me permitió crecer no sólo en conocimiento práctico sino en como establecer vínculos y tratar con personas que no se encuentran en la misma situación que uno mismo” o “la experiencia adquirida durante estas prácticas es invaluable, ya que el aprendizaje además de estar asociado a cuestiones técnicas e incumbencias propias de la carrera, también fue en el ámbito personal. Siento que el hecho de desempeñarse en un entorno que no es el habitual, tanto para una industria como para las personas en general, permite profundizar en las reflexiones de uno mismo, conocer diferentes situaciones de personas que se encuentran privadas de su libertad, como así también, la simple observación de hábitos y costumbres propias, que en estos lugares pasan a ser una rareza o demandan prestar particular atención, y me refiero a cuestiones como la manera de vestirse, de presentarse, el intercambio dialéctico, el cuidado de las palabras, etc.” o de quienes han trabajado en un proyecto de extensión en el Hospital San Roque: “me llevo un montón de experiencia y conocimientos de este tema, es por esto que es muy gratificante no sólo por el conocimiento adquirido sino también por el sentir que en algún punto puedo ayudar a las personas que transitan este centro quirúrgico”.

Para cerrar puedo afirmar que el espacio de la Práctica Profesional Supervisada, al ser informado posteriormente genera en los estudiantes una mirada de lo que han transitado a lo largo de las 200 horas de la práctica con lo que se logra una reflexión sobre la acción. Según Donald Schön (1987) el concepto de "reflexión en la acción" es un proceso mediante el cual los profesionales ajustan y rediseñan su conocimiento en tiempo real mientras enfrentan situaciones prácticas. Este enfoque implica una interacción constante entre la teoría y la práctica, donde el aprendizaje surge directamente de la experiencia. En el hacer de la práctica los estudiantes deberían de realizar "reflexión en la acción" para la toma de decisiones y en particular al realizar el informe realizan una "reflexión sobre la acción", que se da posteriormente a la práctica, ofreciendo una oportunidad para analizar y evaluar críticamente las decisiones tomadas y su impacto. Es necesario que las instituciones de formación profesional continuemos ofreciendo oportunidades para el desarrollo de habilidades reflexivas y contextuales, dado que este enfoque implica una interacción constante entre la teoría y la práctica, donde el aprendizaje surge directamente de la experiencia y es mucho más significativo para el estudiante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de Ingeniería en la República Argentina "Libro Rojo de CONFEDI". Octubre de 2018.
2. Abate, Stella Maris y Orellano, Verónica. Notas Sobre el Curriculum Universitario, prácticas profesionales y saberes en uso. Trayectorias Universitarias. Volumen 1, Nº 1. 2015
3. Abate, Stella M. y Lyons, Silvina. LAS PRÁCTICAS PROFESIONALES EN EL CURRÍCULUM UNIVERSITARIO: PRESENTACIÓN DE UNA INVESTIGACIÓN EN SU ETAPA INAUGURAL. 6º Jornadas ITEE - 2021 - Facultad de Ingeniería – UNLP
4. Schôn, D. (1987): El profesional reflexivo: cómo piensan los profesionales cuando actúan. Paidós. Buenos Aires.

PROYECTO DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA "ENERGÍA SOLAR EN HOSPITAL 2" EN EL HOSPITAL SAN ROQUE DE GONNET

Arocas Sergio M., Coria Hoffmann Geraldine D., Galache Ramón, Martiarena Tomás, Amado Marcos

UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina,
martin.arocas@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de realizar actividades de extensión universitaria y mantenerlas en el tiempo representa un gran valor para las personas involucradas, tanto del equipo extensionista como del sector de la sociedad vinculado. Poder mantener este lazo en el tiempo permite profundizar en las problemáticas tratadas, a su vez de interiorizarse sobre las particularidades del sector.

Este trabajo presenta las actividades de extensión que llevamos a cabo en el marco del Proyecto de Extensión *"Energía solar en hospital 2"*, aprobado con financiamiento por la Resolución Nº454/2023 de la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU) del Ministerio de Capital Humano, en el marco de la convocatoria "Universidad, Cultura y Territorio 2022" [1].

Esta es la continuación del Proyecto de Extensión "Energía Solar en Hospital", mediante el cual prolongamos la vinculación con el Hospital San Roque de Gonnet (partido de La Plata). Sus objetivos surgen de lo recabado en ese primer proyecto en el que se determinaron las condiciones actuales de las instalaciones de climatización del hospital mediante un relevamiento de sus sistemas y mediciones de temperatura y humedad relativa para establecer cuál era la situación en lo referido al confort térmico. De lo realizado allí surgió que en el Centro Quirúrgico del hospital era necesario mejorar las condiciones de calidad de aire interior, requisito para cumplir con la totalidad de la normativa técnica de aplicación. Además, en las tareas del primer proyecto, identificamos un gasto económico en las facturas de electricidad que penalizaba el exceso de potencia eléctrica por sobre los valores contratados a la distribuidora.

Por lo tanto, en base a lo hallado en el proyecto anterior y a lo conversado con personal del hospital (quienes mostraron un gran interés en poder tener a disposición todas las especificaciones técnicas que permitieran adecuar las instalaciones para ofrecer mejor servicio a sus pacientes), delineamos los siguientes objetivos específicos para el Proyecto "Energía Solar en Hospital 2":

- Profundizar en la determinación de las condiciones actuales de la calidad de aire interior del Centro Quirúrgico del hospital, incluyendo confort térmico y renovaciones de aire.
- Proponer acciones para mejorar la calidad de aire interior del Centro Quirúrgico, cumpliendo criterios de eficiencia energética.
- Diseñar la instalación de generación de energía eléctrica a través de energía solar fotovoltaica para abastecer consumos del hospital.

Todas las actividades desarrolladas para el cumplimiento de estos objetivos fueron ejecutadas por docentes y estudiantes vinculados a la UIDET IAME (Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica) y al Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Parte de los integrantes participaron también del primer proyecto, por lo que, con esta continuación, se permite la profundización de la actividad extensionista, con la persistencia del vínculo para aportar soluciones requeridas por la organización vinculante.

DESARROLLO Y RESULTADOS

Con este proyecto buscamos dar solución técnica a dos problemáticas en el Hospital San Roque: las condiciones de calidad de aire interior del Centro Quirúrgico y el gasto por exceso de potencia en la facturación de energía eléctrica.

En los hospitales, el control de la calidad de aire interior se logra a través de los sistemas de acondicionamiento de aire, que tienen asociado un rol que trasciende la mera función de proveer confort térmico. Influyen sobre la recuperación de los y las pacientes y deben suministrar condiciones que eviten que las personas se expongan a agentes patógenos intrahospitalarios. Particularmente, el área quirúrgica de los hospitales es una de las que requiere mayor control de la asepsia en sus condiciones ambientales, debiendo estar correctamente diseñado el sistema de climatización y ventilación para minimizar la concentración de organismos en el aire.

La normativa técnica internacional que define los requisitos de estos sistemas es el Estándar ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2013, el cual establece condiciones de temperatura, humedad relativa, renovaciones de aire por hora y eficiencia de filtrado, para el interior de las distintas áreas de los edificios hospitalarios [2]. En el ámbito nacional, la normativa aplicable es la norma IRAM de emergencia 80400 que se basa en la mencionada norma internacional y tuvo su aprobación en el año 2021, impulsada fuertemente a causa de la pandemia producida por el virus COVID-19 [3].

La importancia de cumplir con estos requerimientos permite brindar una atención segura a los y las pacientes. Por ello las personas responsables del Hospital San Roque mostraron interés en continuar el vínculo iniciado en 2021, con la intención de atender las problemáticas halladas y buscar su solución técnica.

El equipo extensionista de este proyecto estuvo formado por docentes de la UIDET IAME del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ingeniería UNLP y estudiantes de grado de las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electromecánica. En conjunto, se llevó adelante el proyecto que replicó la metodología de trabajo ejecutada en el proyecto anterior, con las modificaciones pertinentes.

En este caso, las personas participantes del proyecto (docentes y estudiantes) se distribuyeron en tres ejes temáticos para la ejecución de las actividades y posterior consecución de los objetivos específicos. Estos son: *Eje 1)* Sistema de climatización y ventilación de los quirófanos; *Eje 2)* Instalación de energía solar fotovoltaica para generación de electricidad, *Eje 3)* Gestión y administración del proyecto.

A su vez en los ejes 1 y 2, para cumplir con los objetivos, desarrollamos una serie de acciones que fueron ordenadoras de las actividades. Estas acciones contemplaban:

1. Tomar conocimiento de la normativa y bibliografía aplicable.
2. Relevar y conocer la situación actual del hospital.
3. Realizar mediciones para precisar la situación actual.
4. Analizar resultados.
5. Proponer acciones que logren mejorar la situación.
6. Revisar las propuestas con personal del hospital y adecuarlas en caso de ser requerido.

Para comenzar el proyecto, realizamos una reunión de presentación en la que parte del plantel docente del equipo extensionista comentaron a los y las estudiantes los objetivos y alcances del proyecto (Figura 1). Además, se comenzó con la planificación de las actividades en base a la división en ejes temáticos anteriormente mencionada.



Figura 1 Reunión de presentación del proyecto

Para atender al primer eje temático y dar solución al problema de la calidad de aire en el interior de los quirófanos, se comenzó con la recopilación de toda la información generada en el proyecto anterior y la definición de qué datos faltaban para poder avanzar en la respuesta. Evaluamos en profundidad las características del Centro Quirúrgico, específicamente aquellas que influyen en la carga térmica de refrigeración y calefacción y las que afectan a la ventilación dentro de los locales, para luego cuantificar la carga térmica incluyendo la simulación horaria de las condiciones energéticas de estos espacios.

Posteriormente, utilizamos estos resultados para proponer diferentes alternativas tecnológicas que permitan abastecer a los quirófanos con las condiciones de temperatura, humedad relativa, renovaciones y filtrado de aire que proporcionen las condiciones adecuadas para la recuperación de los y las pacientes. En base a todo esto, realizamos un proceso de dimensionamiento, especificación técnica y selección de equipamiento para cumplir con la totalidad de los requisitos normativos de calidad de aire en el interior de los quirófanos del hospital. Luego de la evaluación técnica y energética de distintas alternativas, se propone un sistema centralizado compuesto por una bomba de calor reversible de 215 kW de potencia térmica de refrigeración (237 kW de calefacción) y tres unidades manejadoras de aire. Realizamos la propuesta de ubicación de estos equipos en el hospital, el dimensionamiento y trazado del sistema de ductos de distribución de aire, junto con la confección de planos, cómputo y presupuesto correspondiente.

Para el segundo eje temático referido al dimensionamiento de una instalación solar fotovoltaica para generación de electricidad en el hospital, comenzamos con la planificación del relevamiento dimensional de la terraza y un análisis de los datos obtenidos de planos y del proyecto anterior. Luego, concurrimos al hospital y, acompañados por personal del área de residencia en arquitectura hospitalaria que funciona en el Hospital San Roque, tomamos dimensiones de la terraza del primer piso (Figura 2a) y de la terraza del cuarto piso (Figura 2b). Adicional a la medición general de las terrazas, se identificó la ubicación y las medidas de los obstáculos presentes en estas. Todo esto se hace con el fin de tener certeza acerca de la disponibilidad de lugar para la ubicación de los paneles fotovoltaicos de la instalación a dimensionar. El relevamiento fue realizado por docentes y estudiantes integrantes del proyecto (Figura 3).

Los datos obtenidos del relevamiento fueron procesados y volcados en planos e informes técnicos correspondientes, como punto de partida para el dimensionamiento de la instalación solar fotovoltaica. Este proceso continuó con la evaluación del recurso solar disponible en el hospital, la selección de los componentes que integran la instalación fotovoltaica y la propuesta técnica de todo el sistema con su conexión a red para el abastecimiento de parte de la demanda eléctrica del hospital.



(a) *(b)*

Figura 2 Relevamiento dimensional de las terrazas del hospital: *(a)* cuarto piso, *(b)* primer piso



Figura 3 Integrantes del Proyecto en el relevamiento dimensional de la terraza del hospital

El edificio del hospital presenta superficie disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos en las terrazas del primer y cuarto piso. En la terraza del primer piso se cuenta con una superficie libre de 1150 m^2 y en la del cuarto piso 126 m^2. Además, del análisis del recurso solar en la ubicación del hospital se desprende que la irradiación diaria promedio en el plano horizontal tiene su menor valor en el mes de junio (2,3 kWh/m^2/día) y su mayor valor en diciembre (7,41 kWh/m^2/día). Se propuso entonces una inclinación y orientación para los paneles fotovoltaicos para optimizar la generación de energía anual, llevando esos valores de irradiación en plano del panel a 3,38 kWh/m^2/día en el mes de junio y 6,82 kWh/m^2/día en diciembre, con lo que se logra incrementar el valor promedio anual en un 17%.

Posteriormente se seleccionaron los paneles fotovoltaicos y se planteó su distribución espacial en la superficie libre relevada. En esta decisión tuvimos en cuenta el análisis de los elementos generadores de sombras para evitar que repercutan negativamente en la instalación fotovoltaica. Así es que, por ejemplo, para la terraza disponible del cuarto piso del edificio del hospital, se dimensionó una instalación solar fotovoltaica on-grid para la generación de energía eléctrica que consta de un total de 16080 Wp. Adicionalmente se dimensionaron, especificaron y seleccionaron todos los elementos componentes de la instalación eléctrica necesaria para garantizar el funcionamiento del sistema.

De esta manera, en el marco del Proyecto de extensión, se pudo generar la totalidad de las especificaciones y documentos técnicos de la instalación solar fotovoltaica para el hospital, volcadas en informes, planos y diagramas unifilares para ser entregadas a las autoridades del hospital.

A lo largo del proyecto, hicimos reuniones de avance (Figura 4) en las que realizamos un seguimiento de las actividades, con discusión de distintas soluciones técnicas a las problemáticas encontradas. Estas reuniones nos permitieron garantizar la sostenibilidad del proyecto y cumplimentar las metas que llevaron a la consecución de los objetivos.



Figura 4 Reunión de avance del proyecto de extensión

CONCLUSIONES

En las actividades de extensión llevadas a cabo por miembros de la comunidad universitaria, poder lograr que el vínculo con el sector objetivo perdure, permite tener mayor conocimiento sobre las problemáticas y, por lo tanto, proponer soluciones factibles se adecúen mejor a sus necesidades.

Con el desarrollo del proyecto “Energía Solar en Hospital 2”, fue posible seguir la vinculación entre la UIDET IAME y el Hospital San Roque de Gonnet. Las autoridades de éste consideraron beneficioso poder abordar los problemas que se detectaron en el proyecto de extensión anterior y se mostraron involucradas a lo largo de todas las actividades realizadas.

Para los y las integrantes, la ejecución del proyecto resultó una experiencia enriquecedora para aportar soluciones técnicas a un problema concreto y acercar sus conocimientos para mejorar la atención brindada en el hospital.

También para los y las estudiantes, representó un desafío al tener que evaluar distintas alternativas tecnológicas y formar criterios de selección para elegir la que mejor se ajustaba a esta situación particular.

Para los y las docentes involucradas, el proyecto de extensión complementa a las demás actividades desarrolladas en el ámbito académico y permite extender los conocimientos a la sociedad. La formación de estudiantes universitarios, además de aspectos meramente académicos, también contempla desarrollar el sentido social de la profesión ingenieril.

Con las actividades ejecutadas, se generaron propuestas técnicas para que el hospital posea la información necesaria que contribuya a mejorar el servicio que brinda a sus pacientes, a la vez de tender a mejorar su sustentabilidad energética.

Esperamos continuar vinculados con el Hospital San Roque de Gonnet en futuras actividades de extensión.

Agradecimientos

Este Proyecto de Extensión *"Energía Solar en Hospital 2"* fue financiado por la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Capital Humano de la Nación, en el marco de la convocatoria "Universidad, Cultura y Territorio 2022" (Resolución SPU Nº454/2023).

Agradecemos especialmente al equipo directivo del Hospital San Roque y a integrantes de la residencia en arquitectura hospitalaria, que mostraron permanente predisposición durante el desarrollo del proyecto y acompañaron al equipo extensionista para las actividades que hicieron posible finalizar el proyecto.

Agradecimiento a los y las estudiantes que aportaron su tiempo y conocimiento al proyecto, permitiendo cumplimentar la totalidad de los objetivos: Eliseo Uriarte, Guillermo Ibañez, Sofía Longarzo y Matías Calderón.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Resolución Nº454/2023 de la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU) del Ministerio de Capital Humano.

[2] Estándar ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2013. *Ventilation of Health Care Facilities*. (2013)

[3] Norma IRAM 80400. *Sistemas para el tratamiento del aire en establecimientos para el cuidado de la salud.* (2020)

PROPUESTA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL CENTRO REGIONAL UNIVERSITARIO DE BOLÍVAR (CRUB)

Arocas Sergio M., Coria Hoffmann Geraldine D., Gutiérrez Lautaro; Hernández Marcos, Rodríguez Emiliano

UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina, martin.arocas@ing.unlp.edu.ar

I. Introducción

Las fuentes renovables de energía y de cero emisiones han tomado relevancia en los últimos años en Argentina. A partir de la Ley N°27.191, la generación eléctrica del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) con estas fuentes ha aumentado de 2.470 GWh/año en 2015 a 20.086 GWh/año en 2023, pasando a representar el 2% de la demanda de electricidad en el país en 2015 al 14,3% en 2023 [1]. Si bien no se llega a cumplir el objetivo pautado en la mencionada ley (cubrir 18% de la demanda eléctrica con generación renovable al año 2023), se observa un crecimiento exponencial de la producción energética sin combustibles fósiles. Con esto, las emisiones de CO_2 del MEM se ven reducidas, teniendo una disminución del 26% de 2015 a 2023.

A menor escala, también se hace notar la incorporación de fuentes renovables a través de la generación eléctrica distribuida, en el marco de la Ley N°27.424 (2017). Esta ley permite que los usuarios de la red de distribución puedan generar electricidad renovable para autoconsumo e inyectar la energía excedente a la red pública, con proyectos de hasta 12 MW por usuario. Al 2024, la potencia instalada en el marco de esta normativa llega a 59 MW [2].

Por tanto, el crecimiento exponencial de la generación de energía eléctrica con fuentes renovables y la necesidad de reducción de la huella de carbono, conllevan a que los y las profesionales de ingeniería tengan un acercamiento cada vez mayor con instalaciones de producción eléctrica con este tipo de fuentes, entre ellas la energía solar. Por ello, el abordaje de esta temática desde sus aspectos teóricos y prácticos adquiere cada vez mayor relevancia dentro de la currícula de los y las estudiantes de nuestra facultad.

Surge así este trabajo desarrollado por docentes y estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería UNLP en la subsede Bolívar, en el marco de la cátedra *"Termotecnia V"/"Energías Alternativas"*. El objetivo es buscar soluciones para reducir la dependencia del edificio del Centro Regional Universitario de Bolívar (CRUB) de la red eléctrica de distribución, disminuir sus gastos en energía y minimizar su impacto ambiental, a través de una instalación solar fotovoltaica on-grid (conectada a la red).

El Centro Regional Universitario de Bolívar es un edificio destinado a la educación superior en la ciudad de Bolívar, provincia de Buenos Aires. Fue inaugurado en el año 2017 y cuenta con siete aulas, un área administrativa y áreas para actividades complementarias. El CRUB enfrenta un elevado gasto debido a su consumo de energía eléctrica. Esto no solo incrementa los costos operativos, sino que también contribuye a una mayor huella de carbono. El CRUB entonces busca soluciones para reducir su dependencia de la red eléctrica convencional, disminuir costos y minimizar su impacto ambiental.

II. Desarrollo

La cátedra *"Termotecnia V"/"Energías Alternativas"* corresponde a una asignatura que se presenta en el plan de estudios de las carreras Ingeniería Mecánica (materia optativa) e Ingeniería Electromecánica (materia obligatoria) de la Facultad de Ingeniería UNLP. Su contenido se centra en el conocimiento y la aplicación de fuentes de energía no convencionales de origen renovable, entre las que se incluye la energía solar para generación de electricidad a partir de instalaciones fotovoltaicas.

Dentro de la cátedra, los y las estudiantes realizan un trabajo práctico integrador para la aplicación de los conocimientos adquiridos, a fin de dar solución a una demanda de energía específica a través de generación renovable.

Los estudiantes de Ingeniería Mecánica que cursan la carrera en la ciudad de Bolívar, a partir del convenio entre la Facultad de Ingeniería UNLP y el Municipio de Bolívar, desarrollaron el trabajo integrador de la mencionada cátedra teniendo como objetivo la aplicación de energías renovables en el Centro Regional Universitario Bolívar CRUB, edificio donde realizan sus cursadas. Dentro de los objetivos del trabajo, se incluyen:

- ✓ Determinación de la demanda de energía del edificio.
- ✓ Evaluación de los recursos energéticos renovables disponibles.
- ✓ Dimensionamiento de la instalación de energía renovable.
- ✓ Cuantificación de la energía anual generada y de las emisiones de CO_2 evitadas.

Para ello, se plantea la siguiente metodología:

1) Relevamiento energético del edificio.
2) Relevamiento de datos de facturación de suministros energéticos.
3) Simulación del consumo de energía del edificio, verificado con los datos de facturación. Identificación de equipos con uso significativo de la energía.
4) Propuesta de acciones para reducir el consumo de energía (eficiencia energética).
5) Cuantificación del recurso solar disponible en la ubicación del edificio.
6) Identificación de la superficie disponible para ubicación de los paneles fotovoltaicos.
7) Selección de paneles fotovoltaicos.
8) Cálculo y definición de cantidad de paneles.
9) Selección del inversor.
10) Cuantificación de energía eléctrica generada al año.
11) Cálculo de cantidad de emisiones de CO_2 evitadas al año.
12) Determinación de la inversión y ahorro económico.

Realizado de forma grupal por tres estudiantes de la subsede Bolívar que cursaron la cátedra en el año 2024, primeramente se llevó adelante el relevamiento energético del CRUB para la identificación de sus principales características edilicias (incluyendo los materiales de la envolvente y de las aberturas), los usos de cada espacio, así como también días y horarios de desarrollo de sus actividades. Además, se relevaron las características técnicas de los equipos consumidores de energía. De manera resumida, en la Tabla 1 se muestran datos generales sobre el edificio en estudio y en la Tabla 2 se presentan los datos técnicos recabados en el relevamiento. La potencia eléctrica total instalada en el CRUB, al momento del relevamiento, es de 71.849 W.

Tabla 1. Datos generales del edificio CRUB

Edificio: CENTRO REGIONAL BOLÍVAR CRUB
Superficie cubierta: 1584 m^2
Días y horarios de actividades: Lunes a Viernes de 07 a 22 h y Sábados de 8 a 14 h
Principales sectores: - 5 Aulas de 7m x 7m - 2 Aulas de 7m x 14m - 4 Baños - 1 Cocina - 1 Fotocopiadora - 1 Aula de informática - 1 Laboratorio de química - 1 Salón de Usos Múltiples SUM - 1 Biblioteca - 1 Área administrativa - 1 Sala de profesores - 1 Sala de máquinas

Tabla 2. Equipos consumidores de energía eléctrica en el CRUB

Equipo	Cantidad	Potencia unitaria [W]	Potencia total [W]
Ventilador 70W	19	69	1311
Ventilador 180W	6	180	1080
Lámpara	207	11	2277
Parlantes	6	80	480
Televisor	6	180	1080
Proyector	7	172	1204
PC	5	100	500
Notebook	4	80	320
Pava eléctrica	2	2000	4000
Minicomponente	1	14	14
Mezcladora de sonido	1	100	100
Aire acondicionado 1	2	1932	3864
Aire acondicionado 2	4	1561	6244
Aire acondicionado 3	4	830	3320
Aire acondicionado 4	8	1900	15200
Aire acondicionado 5	4	2300	9200
Bomba 550 W	2	550	1100
Bomba 5520 W	3	5520	16560
Bomba 245 W	3	245	735
Heladera	1	120	120
Microondas	1	640	640
Anafe eléctrico	1	1000	1000
Termotanque	1	1500	1500

Con la información relevada, se procedió a realizar una simulación del consumo anual de electricidad en el CRUB. A cada equipo relevado se le asignó un período de utilización, para especificar el tiempo en que se encuentran encendidos, fundamentado en la información provista por personal y estudiantes del CRUB. Con esto, se llevó adelante una simulación mensual del consumo de energía del edificio universitario cuya validación se pudo realizar a

partir de los datos de consumo indicados en la facturación del servicio eléctrico de doce meses consecutivos (Figura 1). El consumo simulado mensual promedio es de 4.690 kWh. Además, de lo simulado se identifica que la principal demanda de electricidad corresponde a los equipos de aire acondicionado que representan el 82% del consumo anual, siendo éste un uso significativo de la energía.

Con base en esto, se identifican tres acciones que se recomienda aplicar para reducir el consumo de energía: mantenimiento regular de los equipos, sensibilización y capacitación del personal y de estudiantes (especialmente en manejo de equipos de aire acondicionado) e implementación de un sistema de gestión de energía.

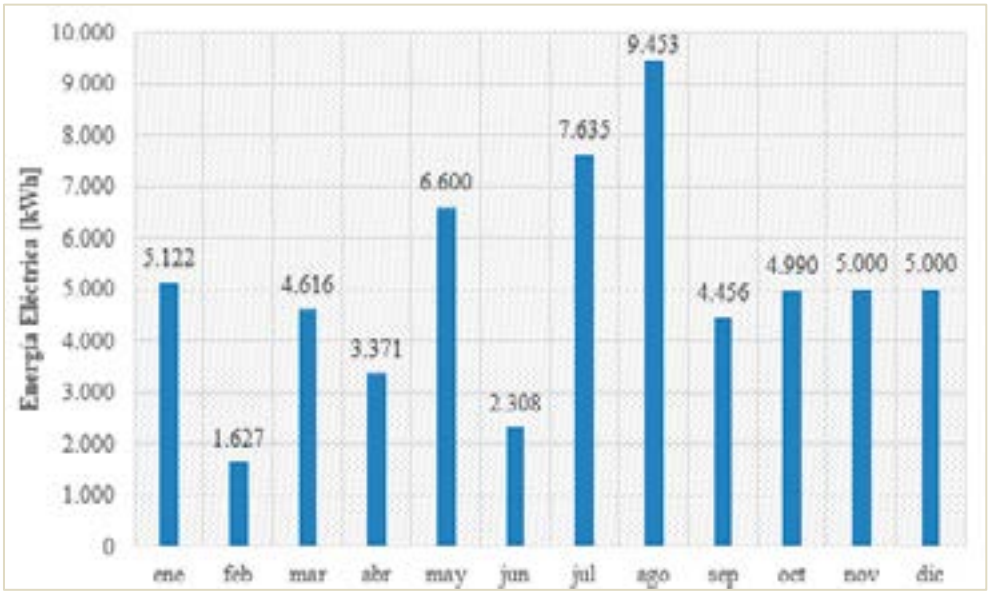


Figura 1. Consumo de energía eléctrica en CRUB, según facturación

Una vez conocido el comportamiento de la demanda de electricidad para la cual se diseñará la instalación solar fotovoltaica, se realizó la evaluación del recurso solar en el lugar disponible para la colocación de los paneles fotovoltaicos. Se toma como criterio de diseño ubicar los paneles de forma paralela a la línea arquitectónica, sobre la cubierta de chapa correspondiente al techo de sus aulas y la biblioteca del CRUB, marcado con verde en la Figura 2. Además, se plantea que la instalación de los paneles sea coplanar con el techo para reducir el costo asociado a la estructura de fijación de paneles.

Así es que se decide ubicar los paneles con una orientación (acimut) de 30º hacia el Este y con una inclinación de 20º. La cuantificación del recurso solar disponible en la ubicación del edificio revela que en el mes de junio se tiene el menor valor de irradiación diaria con 2,95kWh/m^2/día en el plano del panel y el mayor valor en enero 6,82 kWh/m^2/día. Se proponen entonces dos posibles instalaciones fotovoltaicas para generación eléctrica en el CRUB en base a este recurso valores y a la superficie disponible.

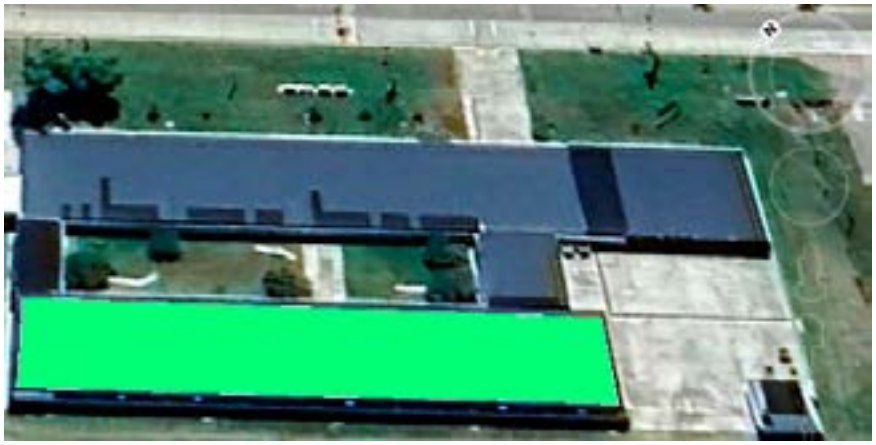


Figura 2 Superficie para la ubicación de los paneles fotovoltaicos en el CRUB

III. Resultados y discusión

Con paneles fotovoltaicos de 575 Wp cada uno, se proponen dos alternativas de instalaciones para el CRUB: una de 50 paneles y otra de 80 paneles, representando entonces instalaciones solares fotovoltaicas 28,75 kWp y 46 kWp, respectivamente. (Se aclara que “Wp” refiere a “Watt pico” unidad que se utiliza para especificar la potencia de los paneles fotovoltaicos en Condiciones Estándar de Ensayo -STC-).

Para la cuantificación de la energía anual generada se incluye, además del recurso solar disponible, el rendimiento de la instalación teniendo en cuenta que las condiciones reales de operación difieren de las especificadas en las condiciones de ensayo del equipamiento fotovoltaico. Este rendimiento, denominado *performance ratio PR*, considera: dependencia de la potencia de los paneles con la temperatura, pérdidas en el cableado de corriente alterna y de corriente continua, pérdidas por dispersión de los parámetros de los paneles, pérdidas por suciedad, polvo y sombras, rendimiento del inversor y pérdidas por disponibilidad de la instalación [3].

Resulta entonces que con la instalación de 28,75 kWp se estima una generación anual de 42.100 kWh de energía eléctrica y con la de 46 kWp, una generación de 71.800 kWh al año. En la Figura 3 se visualiza la energía eléctrica producida por mes con cada instalación. Comparando con el consumo eléctrico del CRUB, se observa que con la instalación de mayor potencia se tienen solamente tres meses en que la generación solar no alcanza a abastecer la demanda del edificio (mayo, julio y agosto). En cambio, con la instalación fotovoltaica de 28,75 kWp, la producción de energía no logra cubrir la demanda en casi ningún mes del año, con excepción de febrero.

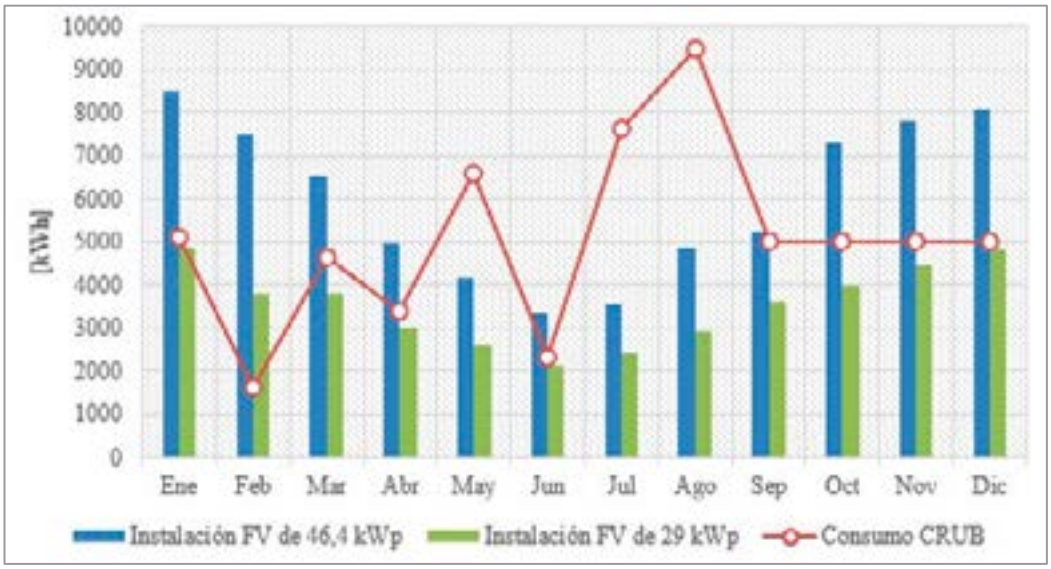


Figura 3 Generación de energía eléctrica con instalación fotovoltaica y consumo eléctrico del CRUB

En términos anuales, con la instalación fotovoltaica de 28,75 kWp se cubre el 69% de la demanda eléctrica del CRUB, lo que permite evitar la emisión de 9,7 toneladas de CO_2. Permitiría la inyección de energía eléctrica a la red sólo en febrero (inyección de 2100 kWh) y requiere una inversión estimada de 30.000 USD.

Por su parte, la instalación dimensionada de 46 kWp permite mayor inyección de energía a la red, con un valor de 22.000 kWh al año, y presenta una inversión de aproximada de 47.000 USD, con un total de 16,5 toneladas de emisiones evitadas de CO_2.

El beneficio económico que podría lograrse con cada instalación se calcula considerando: el ahorro en el gasto debido a la electricidad que deja de consumirse de la red de distribución, el ingreso por la venta de electricidad que se inyecta a la misma y la erogación del monto debido a la electricidad que se debe comprar. Esto da como resultado ingresos anuales en el orden de 1750 USD y 6050 USD para las instalaciones de 28,75 kWp y 46 kWp, respectivamente, con los valores de tarifa eléctrica actualizados a julio de 2024 y sin considerar impuestos [4].

IV. Conclusiones

La generación de energía eléctrica con fuentes renovables ha tomado relevancia en la última década en tanto contribuye a la reducción de la huella de carbono, entre otros beneficios. Su estudio y aplicación por parte de futuros graduados de la carrera Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería UNLP en la Subsede Bolívar derivó en el diseño de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red para el edificio del Centro Regional Universitario de Bolívar CRUB donde realizan sus cursadas.

El dimensionamiento contempla varias etapas entre las que se incluyen la determinación de la demanda eléctrica actual, el análisis del recurso solar disponible, la definición de orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos, selección de equipos, cuantificación de inversión, energía generada y emisiones evitadas de CO_2.

De su aplicación en el CRUB se tiene que el edificio presenta una demanda eléctrica mensual promedio de 4690 kWh. Para la instalación solar fotovoltaica se decide ubicar los paneles sobre el techo del edificio con una orientación de 30º hacia el Este y con la inclinación de 20º que posee el techo. Se analizan dos propuestas de instalación: una de 28,75 kWp con generación anual estimada de 42.100 kWh de energía eléctrica y una de 46 kWp con

generación de 71.800 kWh al año. Con la primera se cubre el 69% de la demanda eléctrica del CRUB, requiriendo una inversión estimada de 30.000 USD; en tanto que con la segunda se genera la totalidad del consumo del edificio con excedente para inyectar a la red, correspondiéndole una inversión 47.000 USD. En el plano ambiental, las alternativas propuestas permitirían evitar la emisión de 9,7 y 16,5 toneladas de CO_2 anuales, respectivamente.

Finalmente se menciona que con la realización de este tipo de actividades que reproducen el desarrollo de un proyecto de ingeniería básica en el ámbito de la generación con fuentes renovables, se pretende acercar a los estudiantes a la resolución de situaciones concretas y prácticas que pudieren encontrar en su futura actividad profesional.

V. Bibliografía y referencias

[1] CAMMESA. *Informe anual 2023.*

https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/

[2] Ministerio de Economía República Argentina. *Reporte anual 2024. Generación distribuida en Argentina*. (2025)

https://www.argentina.gob.ar/reportes-de-avance-implementacion-de-la-ley-27424

[3] IDAE. *Pliego de condiciones técnicas de instalaciones conectadas a red. PCT-C.Rev*. - Octubre 2002.

[4] Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos Provincia de Buenos Aires. *Resolución N°771/2024*.

ARTICULACIÓN ENTRE MATERIALES Y DISEÑO MECÁNICO DE CAÑERÍAS

Ana Laura Cozzarín*, Juan Lacoste, Fernando Ruiz Diaz,
Lucas Feloy, Ernesto Maffia, Daniel Tovio, Gustavo Saralegui
Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

Email:*acozzarin@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

En el marco de la articulación entre materias que se busca en el Departamento de Mecánica se presenta un trabajo donde se expondrá la actividad de articulación realizada en el segundo semestre de los años 2023 y 2024 entre las cátedras Materiales (2° año de la carrera) y Diseño Mecánico de Cañerías (5° año de la carrera) y los resultados obtenidos una vez finalizada. La actividad de articulación concreta se efectúo en el aula de Materiales y se realizó luego que los estudiantes desarrollaron la temática Aceros Inoxidables. El Profesor de Diseño de cañerías, realizó (en conjunto con los estudiantes) la resolución de tres casos de selección de Materiales para aplicaciones concretas de la industria. Como toda actividad docente consciente, antes de trabajar en el aula se debe preparar la actividad concreta. Para ello se efectuaron reuniones y se planificó la actividad. Luego de realizada la actividad, se efectuó de manera voluntaria el llenado por parte de los estudiantes de un formulario de Google para conocer la mirada que tenían de lo realizado y a futuro lograr perfeccionar la actividad. En el presente trabajo se mostrará tanto la actividad en sí como los comentarios de los estudiantes y las reflexiones de quienes la llevan adelante. La totalidad de los estudiantes que realizaron la encuesta expresaron su interés en la actividad y visualizaron la potencialidad de la actividad. Los docentes participantes consideran que la actividad se desarrolló con éxito en ambas instancias y en función de la experiencia del año 2023 se efectuaron cambios en los casos de aplicación de la temática Aceros Inoxidables en el año 2024. Para quienes realizan estas actividades de integración entre materias no sólo es una motivación a los estudiantes sino que es un desafío de transitar de una docencia que toma como unidad docente a cada cátedra a otra en la que esas unidades docentes se amplían para integrar en ellas a todo el colectivo de docentes que trabajan el Departamento de Mecánica.

INTRODUCCIÓN

A partir de la convicción de la importancia de los estímulos en el aprendizaje y de las experiencias realizadas desde la cátedra de Materiales con materias de ciencias básicas [1], [2] y con la intencionalidad de ser ahora la asignatura en la que se desarrolla la actividad concreta se diseñó una articulación entre Materiales (M1603), materia tecnológica básica, y Diseño Mecánico de Cañerías (M1645), asignatura tecnológica aplicada.

La propuesta que realizamos se basa en dos principios del aprendizaje que se consideran básicos (Zabalza, 2010): el primero indica que el aprendizaje mejora si los alumnos son capaces de establecer redes (conceptuales, operativas, funcionales, etc.); es decir, si aprenden relacionando unas con otras. El segundo principio indica que el aprendizaje mejora si las y los alumnos son capaces de dar sentido a las cosas que estudian; es decir, si saben (porque se lo decimos o sugerimos) para qué sirve o a qué se aplica lo que están aprendiendo. Por otro lado, sabemos que la retroalimentación que se genera entre pares de alumnos, entre alumnos y docentes profesionales, siempre aumenta la posibilidad de aprender el contenido relevante de la temática en cuestión y es por ello que diseñamos la actividad.

ACTIVIDAD DESARROLLADA

Previo a la actividad concreta en el aula hubo reuniones entre integrantes de las cátedras afectadas a la actividad para la preparación de todo el material a utilizar. Se mostró la presentación que se utilizaría en la clase teórica y posteriormente se trabajó en los tres casos de aplicación que se iba a mostrar por parte del docente de Diseño mecánico de cañerías en la actividad concreta. El equipo de Diseño, a su vez, armó una presentación de 3 filminas en donde en cada una de ellas estaba la imagen del caso a tratar y desde la cátedra de Materiales se agregaron a los casos de aplicación estudiados posteriormente por los estudiantes casos vinculados a lo que se hablaría en la actividad para darle más fortalecimiento a los conceptos trabajados.

Debido a la gran cantidad de estudiantes que participan de la asignatura Materiales, la actividad se llevó a cabo en dos días diferentes (1 y 6 de noviembre de 2024) y cada una de ellas tuvo una duración promedio de 45 minutos. El tema elegido para la actividad fue aceros inoxidables y el Ing. Gustavo Saralegui propuso la elección de un material en cada uno de los casos elegidos (todos provenientes de casos reales estudiados en la industria nacional), el primero era un intercambiador de calor, el segundo una campana de un horno de tratamiento térmico de recocido y el tercero una caldera humotubular. En la Figura 1 se presentan dos fotografías tomadas desde el fondo del aula en los días de las presentaciones.



Figura 1: Fotografías de las aulas en la actividad concreta. Derecha: M12. Izquierda: M13

La elección del material para cada caso estudiado se hizo en conjunto con los estudiantes para que sea interactiva la propuesta y en la enunciación de las problemáticas se les indicaba a los alumnos que eran parte de un equipo interdisciplinario que debía realizar la selección.

LA VOZ DE LOS ESTUDIANTES

Una vez finalizada la actividad, los estudiantes contestaron una serie de preguntas en un formulario para saber su opinión sobre la actividad. Se les hicieron un par de preguntas de opción múltiple y luego se les dio la posibilidad de que expresaran lo que ellos quisieran. A continuación, en las Figuras 2 y 3 se presentan algunas de las respuestas de los estudiantes.

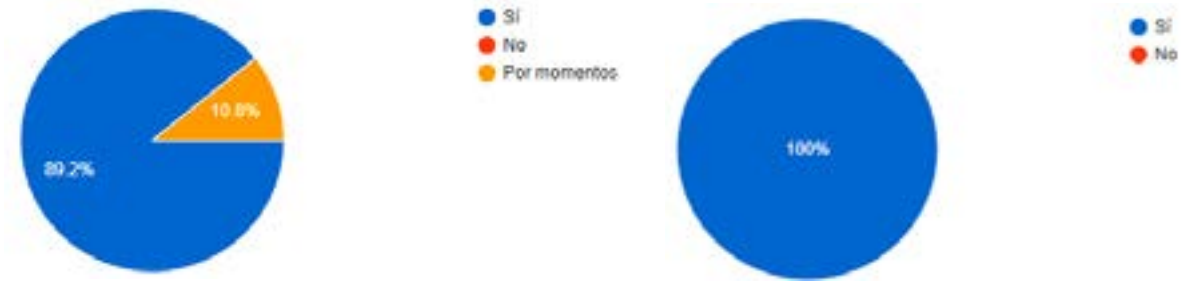


Figura 2: Izquierda: ¿Pudiste seguir la actividad con los conocimientos de Materiales? Derecha: ¿Te pareció interesante la actividad?

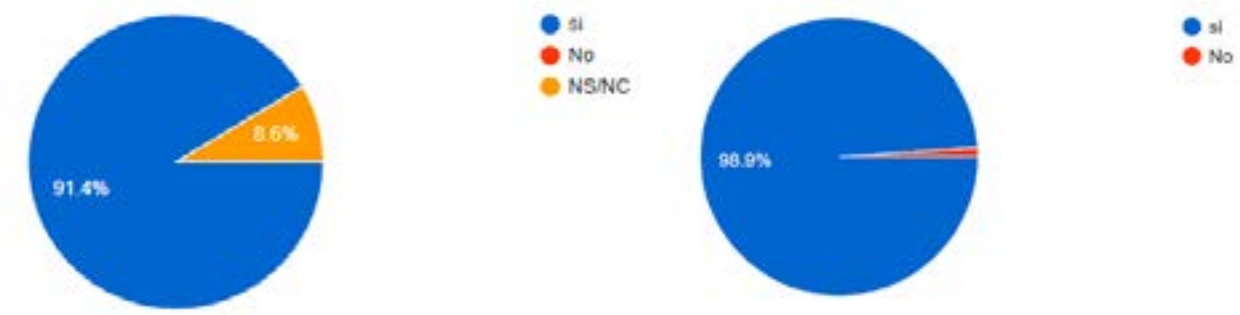


Figura 3: Izquierda: ¿Crees que es importante la articulación entre cátedras? Derecha: ¿Te gustaría participar de otra actividad de articulación entre cátedras?

En una de las preguntas realizadas a los estudiantes para calificar la actividad se les solicitaba indiquen cualidades que creían representaban a la actividad (Figura 4). Entre las opciones que se les proponía el 88.2% eligió Interesante, el 66.7 % estimulante, el 18.3% corta, el 5.4% extensa, el 3% pesada, el 0% Aburrida, el 0% repetitiva, y en la opción de otro, que podían si querían agregar una cualidad, agregaron calificaciones como ser: divertida (Diego, electromecánica), muy divertida (Melvin, Industrial), ejemplificadora y profundizante (Mateo, electromecánica), Clara (Giovana, electromecánica).

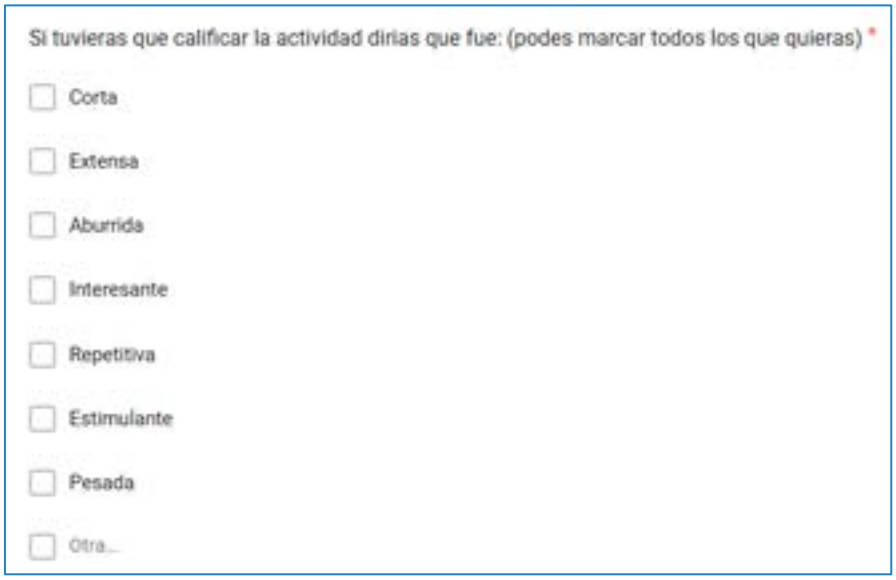


Figura 4: Pregunta donde calificaban la actividad

Consultados los estudiantes sobre que aspectos del encuentro les resultaron más valiosos o útiles nos han dicho, entre otras cosas: "*Poner los conocimientos en práctica en situaciones reales*" (Avril, Aeroespacial), "*Ver las aplicaciones directas de lo que estamos dando*" (Clara, Industrial), "*Estuvo bueno que lo relacionaran con casos reales, y que sea interactivo"* (Kayra, Industrial), "*A pesar de lo corto que fue el encuentro, los conceptos, recomendaciones, consejos, etc fueron muy buenos*" (Félix, Industrial), "*Llevar lo que se habla de forma teórica en clase a la*

realidad, con la explicación y desarrollo de casos reales está muy bueno. Me sirvió la forma de pensar propuesta, que busca simular la solución de cada caso" (Bautista, Industrial), "*Fue interesante visualizar, con los casos de aplicación, como se tienen que tener en cuenta muchos factores a la hora de elegir el acero ideal y las diferentes formas de mitigar la corrosión. El encuentro fue útil para visualizar y entender un poco mejor, nuestras futuras tareas en el campo laboral*" (Giuliana, Industrial), "*Ver cómo es útil en la práctica lo que aprendo teóricamente. Es hasta un poco motivador*" (Martina, aeroespacial), "*Profundizar en la selección de aceros inoxidables según la aplicación y conocer cómo se puede aplicar los contenidos vistos en el mundo real. Además de tener más contacto con el mundo ingenieril además de lo que vemos en la facu ya que al estar en el periodo de ciencias básicas no es mucho*" (Iván, Aeroespacial), "*Me pareció muy interesante como se combinó el tema de la clase con problemáticas reales y poder relacionarlo con la industria del acero en Argentina*" (Franco, aeroespacial).

Al final del formulario, aquellos que quisieran podía realizar un comentario de la actividad y entre otros muy similares encontramos los siguientes: "*Me pareció super interesante y enriquecedora"* (Maite, Industrial), "*Muy buena y entretenida"* (Manuel, Industrial), "*Estuvo muy buena y vale la pena poder relacionar lo que damos en la material con algún problema que nos puede llegar a tocar solucionar en un futuro"* (Matias, Industrial), "*Que haya más actividades como esta"* (Juan, Aeroespacial), "*Considero que la dinámica que uso el profesor durante la clase le dio mucho más sabor al tema y que no se vuelva tan tediosa la clase"* (León, electromecánica), "*Estuvo muy buena la idea. Agregaría una actividad que los profesores hagan al final de las clases preguntas que estén a nivel del parcial de cada tema visto en el día"* (Facundo, mecánica), "*Me gustaría que haya más actividades de articulación. Considero que todo conocimiento compartido de un ingeniero de cualquier especialidad es experiencia que se nos regala, Estuvo muy buena, ¡me gustaría una que tenga que ver con mi ingeniería!"* (Santiago, Aeroespacial), "*Sigan dando actividades así"* (Onaci, Aeroespacial), "*Me gustó mucho :)*" (Paloma, Aeroespacial), "*Gracias por hacerlo"* (Manuel, Aeroespacial).

Como se visualiza en el párrafo anterior todos aquellos estudiantes que quisieron escribir algo en la zona de comentario lo han hecho con el fin de alentar que se sigan haciendo este tipo de actividades.

CONCLUSIONES

A partir de esta actividad se logró articulación vertical entre cátedras propias del Departamento y quienes suscriben comparten que trabajar en conjunto entre docentes de distintas cátedras brinda una oportunidad para reflexionar más allá de la experiencia en sí en el quehacer docente. Las reuniones previas a la actividad, como así también la posterior dieron las instancias de reflexión para visualizar aquellas posibles acciones a efectuar en el aula para despertar el interés en los estudiantes.

Conversando con el estudiantado luego de la actividad se ha llegado a visualizar también que si se les avisa que en medio de una cursada expone alguien externo (que no verán a la semana siguiente para conversar) en un corto tiempo y que lo expuesto, si bien es parte de la

asignatura no se encuentra en la bibliografía entregada por la cátedra, los estudiantes prestan más atención dado que no habrá otra instancia para adquirir “eso” que se les está presentando.

Los números que arrojan las estadísticas y las devoluciones realizadas por los alumnos y las alumnas de Materiales indican que este tipo de actividades son estimulantes y gratificantes para los estudiantes, que a partir de este tipo de encuentros se les despierta a algunos de ellos una mirada diferente de la profesión y les permite comenzar a proyectarse en su vida laboral.

La actividad realizada, se repetirá en el presente semestre dado que el aprendizaje mejora cuando aumentan las actividades complementarias utilizadas para representar el contenido a aprender, es por ello que los docentes del Departamento dedicamos tiempo a actividades suplementarias, para de esta forma lograr un estímulo adicional en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

BIBLIOGRAFÍA

Cozzarín, A., Trípoli, M. y Feloy, L. (2021). Articulando Mate(riales) A. Libro de Actas de las 6tas Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza / La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Libro digital, PDF, pp. 526-531

Cozzarín, Ana Laura; Devece, Eugenio ; Feloy, Lucas ; Torroba, Patricia ; Trípoli, María de las Mercedes (2023) Ley de Hooke: un punto de encuentro entre Matemática A, Física I Y Materiales. Libro de actas de las 7mas Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza / La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Libro digital, PDF, pp. 105-110.

Cozzarín, A., Lopardo, E.; Saralegui, G.; Tovio, D.; González, A. (2008) “El desafio de adaptar los contenidos” VI Jornadas de CAEDI. 17 – 19 de Septiembre de 2008, Salta. ISBN 978-987-633-011-4

Zabalza, M.A. (2012). Articulación y rediseño curricular: el eterno desafío institucional. R*evista de Docencia Universitaria*. *REDU*. Vol. 10 (3) Octubre-Diciembre, pp. 17-48 http://www.red-u.net/

HACIA UNA ÉTICA DE LA EXPLORACIÓN ESPACIAL: RESPONSABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN LA ERA SATELITAL

González Allonca, Juan Cruz[(2)], Tovio, Daniel Oscar[(1)], Cozzarin, Ana Laura[(1)], Feloy, Lucas[(1)], Ruiz Díaz, Fernando[(1)], Lacoste, Juan León[(1)], Palmieri, Julieta[(2)], Maffia, Ernesto[(1)]

(1) ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina
(2) Centro Interdisciplinario de Estudios Espaciales (CIEE), Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina
jallonca@ciee.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

Los satélites en órbita son la base de nuestra vida moderna. Proporcionan servicios de comunicación a largas distancias, monitoreo del tráfico aéreo, dan información meteorológica, realizan búsquedas y rescates, proporcionan información sobre el medio ambiente, entre otras cosas. Todos estos avances han aumentado las actividades espaciales pero también ha contribuido a la creciente nube de escombros que rodea nuestro planeta.

Para plasmar una idea de la gravedad de la amenaza, los más de 6.840 lanzamientos desde los 60 años han generado unos 40.500 objetos calificados como basura espacial mayores a 10 cm, 1.100.000 de 1 a 10 cm, de los cuales solo unos 39.340 y son rastreados regularmente por la Red de Vigilancia Espacial de los Estados Unidos. De todos esos objetos solo una pequeña fracción, alrededor de 11.000, son satélites operativos. Esta gran cantidad de hardware espacial tiene una masa total de más de 13.500 toneladas [1]. Con las tasas actuales de lanzamiento anual de alrededor de 259 [2], y con las futuras rupturas que continúan ocurriendo a tasas históricas promedio de 12 [3] por año, el número de objetos de desechos en el espacio aumentará constantemente y con ello la probabilidad de colisiones catastróficas. Duplicar el número de objetos aumenta el riesgo de colisión en aproximadamente cuatro veces. A medida que crezca la población de escombros, se producirán más colisiones.

Todo parece indicar que en un futuro cercano nada cambiara, por lo tanto, las colisiones comenzarán a prevalecer por sobre las explosiones ahora dominantes y así, los fragmentos de colisión chocarán con otros fragmentos de colisión, hasta que toda la población se reduzca a tamaños subcríticos. Este proceso autosostenido, que es particularmente crítico para la región LEO, y se conoce con el nombre de "síndrome de Kessler"[4]. Debe evitarse mediante la aplicación oportuna de medidas de mitigación y remediación a escala internacional.

Este trabajo pretende poner en conocimiento que, sin una estrategia adecuada de mitigación, estamos dejando un legado de riesgo e inseguridad para las futuras misiones espaciales, con impactos que pueden prolongarse durante siglos.

IMPACTOS DE LA BASURA ESPACIAL EN AMERICA LATINA

El aumento de lanzamientos y la proliferación de objetos en el espacio han incrementado la generación de desechos espaciales, lo que representa un desafío para la sostenibilidad espacial en Argentina y América Latina, por ejemplo, en los reingresos de objetos a la atmósfera, la afectación en la observación astronómica y radioastronómica, así como los impactos sociales y culturales. La creciente actividad espacial y la

expansión de megaconstelaciones satelitales aumentan el riesgo de reentrada incontrolada de desechos. Aunque el peligro de impacto en personas sigue siendo bajo, la tendencia sugiere que, sin medidas de mitigación, el riesgo podría aumentar significativamente. Entre 2010 y 2020, más de 600 objetos mayores a 1 m² reingresaron a la atmósfera de forma incontrolada, con una masa total de aproximadamente 1,100 toneladas[5]. Por su lado, en América Latina, entre 2004 y 2024 se estimó la reentrada de 1,146 objetos en la región, de los cuales 234 cayeron sobre Argentina y áreas cercanas. En los últimos cinco años, el 48.87% de las reentradas globales ocurrieron, porcentaje que se eleva a 51.28% en el caso de Argentina[6].

A su vez, las mega constelaciones, como Starlink, Kuiper y OneWeb, podrían alcanzar decenas de miles de satélites en los próximos años, generando interferencias en observatorios de América Latina. La contaminación lumínica y la emisión de radiofrecuencia dificultan la detección de señales astronómicas de baja frecuencia, afectando estudios sobre el universo primitivo. Aunque algunas empresas intentan reducir estos efectos, la mitigación sigue siendo voluntaria y no está garantizada por regulaciones internacionales [7]

Desde la astro sociología y la etnoastronomía, el aumento de satélites y la contaminación lumínica han modificado la relación de diversas comunidades con el cielo nocturno. En Argentina, estudios en Santa Fe analizan cómo la contaminación lumínica afecta la percepción del cielo en comunidades agrícolas. Asimismo, investigaciones sobre el pueblo Toba en Formosa destacan cómo la diferencia entre el cielo actual y el de sus ancestros genera nuevas interpretaciones basadas en su conocimiento ancestral y en la influencia de la sociedad moderna [8,9]

EL PROBLEMA DE LA BASURA ESPACIAL: EL CAMINO HACIA LA TOMA DE CONCIENCIA

Sería una buena medida concientizar tempranamente a los futuros profesionales acerca del problema de la basura espacial, incorporando temáticas afines en su formación. Esto los volvería conscientes del problema y podrían desarrollar soluciones desde la etapa de diseño. Existen válidas razones para incorporar estos conocimientos:

Concientización temprana: Los estudiantes comprenden el impacto ambiental y tecnológico de los desechos espaciales.

Diseño responsable: Adoptando un diseño responsable se fomenta la creación de satélites con mecanismos de desorbitación y materiales que faciliten su ablación en la reentrada

Cumplimiento normativo: Se familiarizan con regulaciones como la **ISO 24113** y las directrices de la ONU.

Innovación tecnológica: Motiva la investigación en propulsión eficiente, órbitas cementerio, reciclaje orbital y captura de escombros.

La Incorporación de **Ética Espacial** como temática en la formación académica es importante ya que aborda la ética espacial, la sostenibilidad orbital y la normativa internacional sobre basura espacial. La ética espacial debe ser vista como una temática transversal que ayude a los futuros profesionales a tomar decisiones informadas sobre el diseño, operación y disposición final de los satélites y otras infraestructuras en órbita. Se pueden desarrollar módulos específicos que analicen casos reales de contaminación espacial, así como las implicaciones legales y tecnológicas de la acumulación de

escombros en el entorno orbital. Además, los estudiantes deben familiarizarse con tratados y normativas internacionales como el Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre de 1967[10] las directrices del Comité de las Naciones Unidas sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (COPUOS) y las recomendaciones de la Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA). Con este conocimiento, podrán contribuir al desarrollo de estrategias innovadoras para reducir la basura espacial y promover prácticas responsables en el uso del espacio.

Otra temática interesante para tomar conciencia de este problema sería la **Simulación y Modelado de Escenarios de Basura Espacial**, donde a través de herramientas digitales y software de simulación, los estudiantes podrían visualizar los efectos de la congestión orbital y comprender las consecuencias de la inacción. Las simulaciones permiten evaluar en tiempo real la evolución de los residuos espaciales, predecir colisiones y analizar cómo diferentes estrategias de mitigación pueden reducir el problema. Existen diversas herramientas especializadas utilizadas en el sector académico y profesional, entre ellas:

1. **NASA Orbital Debris Engineering Model (ORDEM)**: Un modelo desarrollado por la NASA que proporciona predicciones sobre la distribución y evolución de la basura espacial en diversas altitudes.
2. **ESA DRAMA (Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis)**: Software de la Agencia Espacial Europea utilizado para evaluar los riesgos de impacto de residuos orbitales y diseñar estrategias de mitigación.
3. **AGI Systems Tool Kit (STK)**: Una plataforma avanzada que permite simular trayectorias orbitales, calcular probabilidades de colisión y planificar maniobras de evasión.
4. **Debris Assessment Software (DAS)**: Herramienta recomendada por la NASA para evaluar el cumplimiento de normas internacionales sobre mitigación de basura espacial.
5. **Space Surveillance and Tracking (SST)**: Programas operados por diversas agencias espaciales para rastrear y analizar en tiempo real objetos en órbita.

El uso de estos programas en la formación ayudara a los estudiantes a comprender la dinámica de la basura espacial y a desarrollar soluciones innovadoras para la gestión sostenible del entorno orbital.

Fomento del Diseño Responsable de Satélites seria otra de las temáticas que se podrían incorporar. Los futuros ingenieros y científicos deben desarrollar tecnologías que incorporen estrategias avanzadas de desorbitación y empleen materiales diseñados para facilitar la ablación durante la reentrada atmosférica. Estas estrategias incluyen:

- **Mecanismos de Desorbitación:** Implementación de veleros de arrastre, propulsores eléctricos de baja potencia para maniobras de descenso y sistemas de eyección controlada.
- **Materiales Ablativos:** Uso de polímeros avanzados, aleaciones con alta reactividad atmosférica y estructuras que favorezcan la fragmentación segura.
- **Modelado y Simulación:** Desarrollo de software predictivo para calcular la trayectoria de desintegración y evaluar el impacto en la reentrada.
- **Cumplimiento de Normativas:** Integración de protocolos exigidos por agencias espaciales y organizaciones internacionales.

Casos de Estudio y Normativas Específicas, sería otra herramienta que los estudiantes podrían emplear, utilizando los resultados disponibles de las misiones espaciales recientes que han aplicado estrategias de mitigación, con el objetivo de sacar conclusiones de las misiones más exitosas. A continuación se detallan las más interesantes:

- **RemoveDEBRIS:** Proyecto europeo para la captura de escombros espaciales mediante redes y arpones.
- **E.Deorbit (ESA):** Programa de la Agencia Espacial Europea para eliminar satélites inactivos de la órbita terrestre baja.
- **End-of-Life Services by Astroscale (ELSA-d):** Demostrador de tecnología para la captura y eliminación de satélites fuera de servicio.
- **Satélites OneWeb y Starlink:** Estrategias de desorbitación planificadas por operadores comerciales para evitar la acumulación de residuos en órbita baja.

Se podrían abordarán además las normativas más relevantes, como:

- Directrices del Comité sobre Usos Pacíficos del Espacio Exterior (COPUOS).
- Requisitos de mitigación de desechos espaciales de la NASA y la ESA.
- Normas ISO 24113 sobre seguridad y reducción de basura espacial.
- Regulaciones nacionales de Estados Unidos, la Unión Europea y otras jurisdicciones clave.

A su vez, para darle continuidad al abordaje sobre esta temática sería deseable crear un grupo interdisciplinario de investigación dentro de la Facultad de Ingeniería. El grupo podría generar contenido actualizado y adaptado para las temáticas propuestas, incluyendo casos de estudio, simulaciones y herramientas de modelado específicas para nuestros contextos locales y regionales. A su vez, podría impulsar proyectos de investigación aplicada sobre mitigación de desechos, nuevos materiales para la construcción de satélites, diseño sostenible y nuevas tecnologías de remediación espacial, articulando los conocimientos de la ingeniería con aspectos legales, éticos y socioambientales. Además, el carácter interdisciplinario del grupo permitiría integrar no sólo a ingenieros, sino también a especialistas en derecho espacial, astrofísicos, biólogos y expertos en ciencias sociales, para abordar de manera integral los desafíos éticos y técnicos que plantea la exploración y utilización del espacio.

Un caso de éxito en este sentido lo presenta la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), de Suiza, con su eSpace – Space Center. Este centro interdisciplinario se dedica a la investigación, formación y desarrollo de soluciones para una industria espacial sostenible. En eSpace se desarrollan programas de investigación sobre sostenibilidad orbital, remediación de desechos espaciales, diseño responsable de misiones espaciales y responsabilidad ambiental. Además, promueve un enfoque sistémico e interdisciplinario, integrando ingeniería, ciencias sociales, derecho y economía [11]. Un grupo dedicado a estas temáticas aportará a los futuros profesionales conocimientos para responder a desafíos globales de sostenibilidad espacial. También se logrará fortalecer la investigación aplicada en un área estratégica y posicionar a la Facultad de Ingeniería como referente regional sostenibilidad espacial.

COMENTARIOS FINALES

Promover la participación de formadores de profesionales en proyectos nacionales e internacionales sobre sostenibilidad puede generar conciencia y motivar la búsqueda de soluciones innovadoras. La basura espacial, al igual que la basura que se genera en la Tierra, es un problema creado por la humanidad y, por lo tanto, es nuestra

responsabilidad encontrar soluciones. Si no actuamos ahora, las generaciones futuras heredarán un espacio saturado e inseguro que podría frenar el progreso científico y tecnológico. La educación y la sensibilización de los profesionales en formación son herramientas claves para garantizar que el espacio exterior siga siendo un recurso accesible y seguro para todos. Nuestra misión no sólo es explorar el cosmos, sino protegerlo para quienes vendrán después de nosotros

BIBLIOGRAFIA

1.European Space Agency. (n.d.). *Space debris by the numbers*. ESA. Retrieved https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers
2.McDowell, J. (2025, January 15). Report: Space Activities in 2024 (Jonathan McDowell 2024) page 4-14.
3.European Space Agency. (n.d.). *The current state of space debris*. ESA. Retrieve https://www.esa.int/SpaceSafety/Space_Debris/The_current_state_of_space_debris
4.Kessler, D. J., & Cour-Palais, B. G. (1978). Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. Journal of Geophysical Research, 83(A6), 2637-2646
5.Liou, J.-C., & Johnson, N. L. (2008). Instability of the present LEO satellite populations. Advances in Space Research, 41(7), 1046-1053.
6.C. Pardini and L. Anselmo, The Kinetic casualty risk of uncontrolled re-entries before and after the transition to small satellites and mega-constellations, Journal of Space Safety Engineering (2022)
7.González Allonca, J. C., Pesoa, R., Alfaro, F., & Palmieri, J. (2024). Impacts of Space Debris in Argentina and Latin America: Regulation and Best Practices for Mitigation. Centro Interdisciplinario de Estudios Espaciales, Comisión Nacional de Actividades Espaciales – Universidad Nacional de La Plata.
8.A. Mudrik, *"Las luces de San Cristóbal" y las heladas: un estudio etnoastronómico de relaciones con rasgos de contaminación lumínica en cielos de contextos rurales*, II Jornadas de Epistemología e Historia de la Astronomía, Córdoba, Observatorio Astronómico de Córdoba UNC y Centro de Investigaciones "María Saleme de Burnichon" (F.F. y H - UNC), (2023)
9.M. Vera, *Etnoastronomía entre los tobas del oeste formoseño, una mirada actualizada*, Tesis de Grado, UNLP , http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/150693 (2023)
10.Naciones Unidas. (1967). Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes (Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre). Recuperado de https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html
11.EPFL eSpace. (2024). eSpace – EPFL Space Center. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Recuperado de https://espace.epfl.ch/

DESARROLLO DEL PROCESO DE FABRICACION DE MANGANINA UN MATERIAL PARA RESISTENCIAS ELECTRICAS

Daniel OscarTovio[(1)], Horacio Frene[(2,*)], Ernesto Gustavo Maffia ([1]), Jerónimo Mora[(1)], Ana Laura Cozzarin[(1)], Lucas Feloy[(1)], Fernando Ruíz Díaz[(1)], Juan León Lacoste[(1)], Carlos Arrojo[(2)]

(1) ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

(2) Leme, Laboratorio de Ensayos y Mediciones Eléctricas, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

** hfrene@ing.unlp.edu.ar*

INTRODUCCION

Las aleaciones empleadas en la fabricación de resistencias eléctricas son esenciales en diversas aplicaciones industriales y electrónicas. Existen en el mercado diversos materiales empleados como resistencia con nombres comerciales bien característicos (Nicromo, Constantán, Manganina, Kanthal, entre otros). Cada uno tiene propiedades únicas que los hacen ideales para distintos entornos, desde la precisión requerida en instrumentación y medición, hasta la resistencia y durabilidad necesarias en condiciones de alta temperatura, proporcionando soluciones eficientes y confiables.

El caso de la manganina, es una excelente elección para aplicaciones en instrumentos de precisión, sistemas de medición y dispositivos electrónicos sensibles. En estos casos, la exactitud, la estabilidad a largo plazo y la confiabilidad en entornos de medición constantes son cruciales para el desempeño y la calidad del sistema final. Se trata de una aleación metálica formada por cobre, manganeso y níquel, desarrollada a finales del siglo XIX con propiedades únicas en términos de resistencia eléctrica. Su característica más destacada es su bajo coeficiente de temperatura, así como su reducido potencial termoeléctrico, que es de aproximadamente 1 µV/°C. Este valor excepcionalmente bajo se debe a la incorporación de un 2% de níquel en su composición. La manganina presenta una resistividad de 43 µΩcm y un coeficiente de temperatura negativo en el rango de 0 °C a 100 °C, con valores comprendidos entre -3E-6 y -20E-6. La relación entre su resistencia y la temperatura describe una curva parabólica, alcanzando un valor máximo positivo entre los 25 °C y los 30 °C, donde el coeficiente de temperatura es positivo únicamente en este rango estrecho. Es necesario destacar que hay dos términos que pueden generar confusión en el ideario de las resistencias. Por una parte, está el termino manganina y por otro, la manganina shunt. La primera acepción se refiere al material en sí mismo, mientras que la manganina shunt es un tipo de resistencia fabricada con manganina, diseñada específicamente para medir altas corrientes. Los “shunts” son dispositivos resistivos de bajo valor de resistencia que se colocan en serie con la corriente a medir, generando una caída de voltaje proporcional. Sin embargo, la MANGANINA no es la única aleación con estas propiedades. La empresa British Alloy desarrollo aleaciones de composición similar con los siguientes nombres comerciales: MINALPHA, TELCUMAN y TARNAC. También se desarrollaron aleaciones libres de Ni, denominadas comercialmente como ISABELLIN y NOVOKONSTANT. Los americanos desarrollaron una aleación de características

similares a la MANGANINA, pero usando aluminio en lugar de Ni. Esta aleación se llama THERLO y tiene una composición química de 85%Cu-9,5%Mn-5,5%Al. La resistividad es de 45 μΩcm y su potencial termoeléctrico es de aproximadamente de 0,3 μV/ºC, en el rango de 0 a 100 ºC. Este valor puede reducirse a 0,1 μV/ºC, agregando 0,15% de Fe.

A continuación se presenta una tabla con las características principales de algunas de las tantas aleaciones similares a la MANGANINA. En este cuadro se observa que la composición no es un factor crítico, ya que apreciables variaciones en el contenido de Mn y Ni dan valores bajos de coeficientes de temperaturas y bajos potenciales termoeléctricos.

Tabla 1: Variación de propiedades en función de la composición química

Composición			**Coeficiente de temperatura (ºC)**		**Resistencia Especifica (μΩ-cm)**	**Potencial termoeléctrico vs Cu (μV/ºC,)**
Cu	**Mn**	**Ni**	**0-100ºC**	**10-40ºC**		
86	12	2	-0,000020	+0,000010	43	1,06
83	12	5	-0,000020	-0,000004	43,3	1,57
83	14	3	-0,000030	-0,000006	48,3	0,19
87	12	1	-0,000010	-0,000009	39,6	0,02
87	10	3	-0,000010	-0,000004	35	1,36
85	12	3	-0,000006	-0,000003	40,5	0,38

Es objeto de este trabajo experimental desarrollar el proceso de fabricación de la MANGANINA comprendiendo el origen de los defectos y como controlarlos para gobernar la calidad del material.

MATERIALES Y METODOS

La aleación se fabrica a partir de elementos puros (Cobre, Magnesio, Manganeso y Níquel). Para ello, se utiliza un horno de inducción de media frecuencia y un crisol de Carburo de Silicio. Se escoge producir una pieza fundida de 450 mm de longitud, siendo esta forma de fuerte tendencia a generar defectos de contracción y defectos superficiales. El molde se fabrica utilizando arena, resina y catalizador de origen comercial. La pintura utilizada en el molde es grafito disuelto en alcohol. La estructura interna del material fabricado es analizada por microscopia óptica (LEICA). La composición química se analiza por medio de fluorescencia de rayos x (BRUKER)

La composición deseable de la aleación debe ser la siguiente:12-16% de Manganeso, 2-4% de Níquel y el resto de Cobre.

El sistema de fusión y colado se acondiciona para fundir una carga de 6 kg. Como estrategia para inhibir la formación de gases se lleva a cabo, primero, un proceso de fusión “oxidante” y en la siguiente etapa del proceso se reduce el óxido de cobre con magnesio puro. Posteriormente, se retira la escoria de óxidos, se eleva la temperatura del líquido y se vierte en el molde

RESULTADOS

En la fabricación de piezas de cobre o de alguna de sus aleaciones, los defectos que se presentan con mayor frecuencia son las cavidades de contracción y otras generadas por segregación de gas (porosidad). Estos defectos presentan diferencias en su forma y apariencia, por lo tanto, con una observación cuidadosa se pueden identificar

correctamente. Las cavidades generadas por gas tienen forma esférica o alargada, de fondo brillante y liso; se producen cuando la presión del gas excede la presión del metal durante la solidificación y forman cavidades con bordes regulares encontrándose en la mayor parte de las fundiciones cerca de la superficie de la pieza. Por otra parte, las cavidades de contracción se distinguen por tener bordes irregulares, paredes interiores de textura esponjosa, recubiertas por una estructura con forma de helecho conocida como dendrita. Este tipo de defecto tiene su origen en la falta de material líquido que compense la contracción volumétrica del metal durante la solidificación. Aunque ambas tienen características bien diferenciadas, en algunos casos las soluciones para ambos defectos pueden coincidir, mientras que en otros casos son completamente opuestas. Por ejemplo, las cavidades de contracción suelen encontrarse en secciones gruesas o en transiciones abruptas de espesor o en zonas donde se concentran puntos calientes. Sin embargo, estas zonas también pueden ser susceptibles a defectos por gas o desgarros en caliente. Por lo tanto, la identificación precisa del tipo de cavidad es esencial para aplicar las medidas correctivas adecuadas y así evitar la recurrencia de estos problemas en la producción. El desarrollo de este trabajo experimental comienza con una primera fusión y colado de manganina en molde de arena. Se utiliza como desoxidante, 5 gramos de Magnesio por kilo de aleación. Las imágenes presentadas en la figura 1 permiten observar, que la superficie de la pieza terminada no muestra defectos clásicos de llenado con metal frío. Para realizar el estudio completo de la estructura interna de la pieza, se secciona la misma en varias zonas, como lo muestra la figura 1. En la llamada zona 1 se pueden ver los rastros inequívocos de una gran cavidad de contracción por falta de alimentación. Sin lugar a dudas, el montante escogido no funciono adecuadamente como para alimentar la contracción central. Por otro lado, la zona 2 muestra otro tipo de defecto, que son poros o cavidades esféricas o alargadas; estas se movieron más lentas que el avance del frente de solidificación, quedando atrapados en el sólido. Los poros están distribuidos en el primer tercio de la pieza. Éstos se formaron por el gas generado por la reacción entre el óxido de cobre e hidrógeno. Puede argumentarse también que la fusión oxidante no fue suficientemente como para minimizar la concentración de hidrógeno en el líquido; de esta manera, se dieron todas las condiciones para que se combine hidrógeno con el óxido de cobre, resultando en la reacción de vapor, causa principal de los poros.

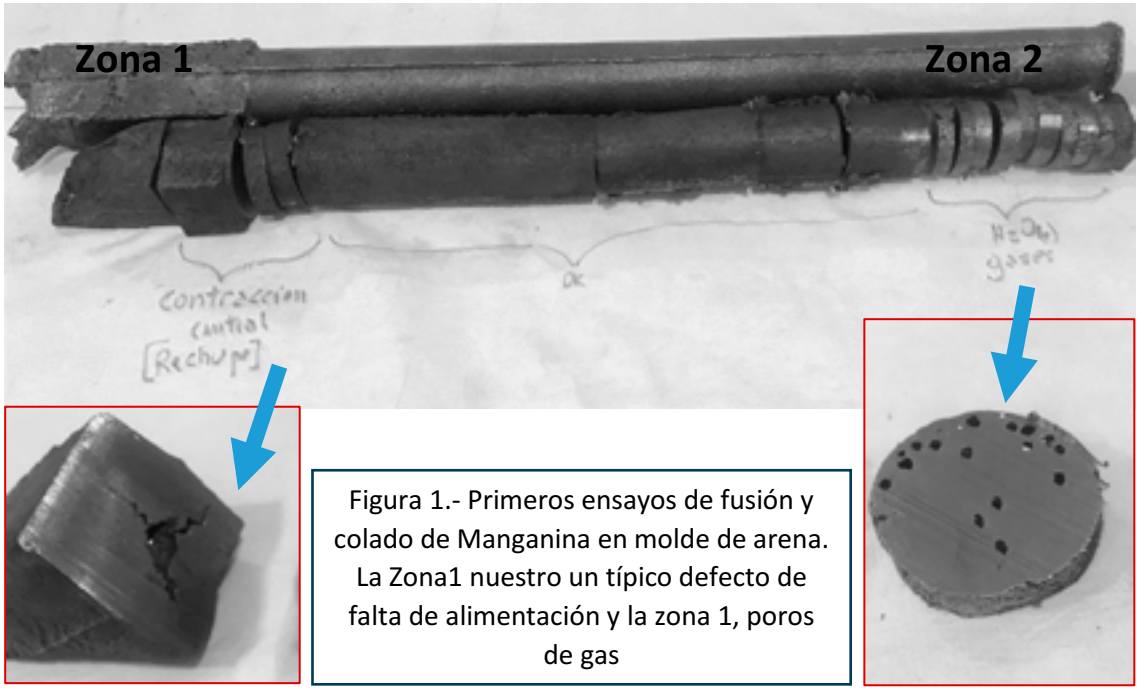


Figura 1.- Primeros ensayos de fusión y colado de Manganina en molde de arena. La Zona1 nuestro un típico defecto de falta de alimentación y la zona 1, poros de gas

Se realiza un segundo ensayo con el objetivo de encontrar la cantidad óptima de desoxidante. Se agregan 10 gramos de Magnesio por kilo de aleación y nuevamente se funde y se cuela en molde de arena. Se vuelve a seccionar la pieza en las mismas zonas que la anterior, encontrándose que, solo en los 10 mm iniciales de la pieza aparece algún vestigio de porosidad, pero siguientes cortes no muestran este defecto. Evidentemente el incremento en la cantidad del desoxidante es el remedio adecuado para controlar la presencia de poros y cavidades de gas. El único defecto que aparece en este ensayo es la contracción por falta de alimentación, lo cual es un problema relacionado a la solidificación dirigida y al montante. La figura 2 muestra este resultado

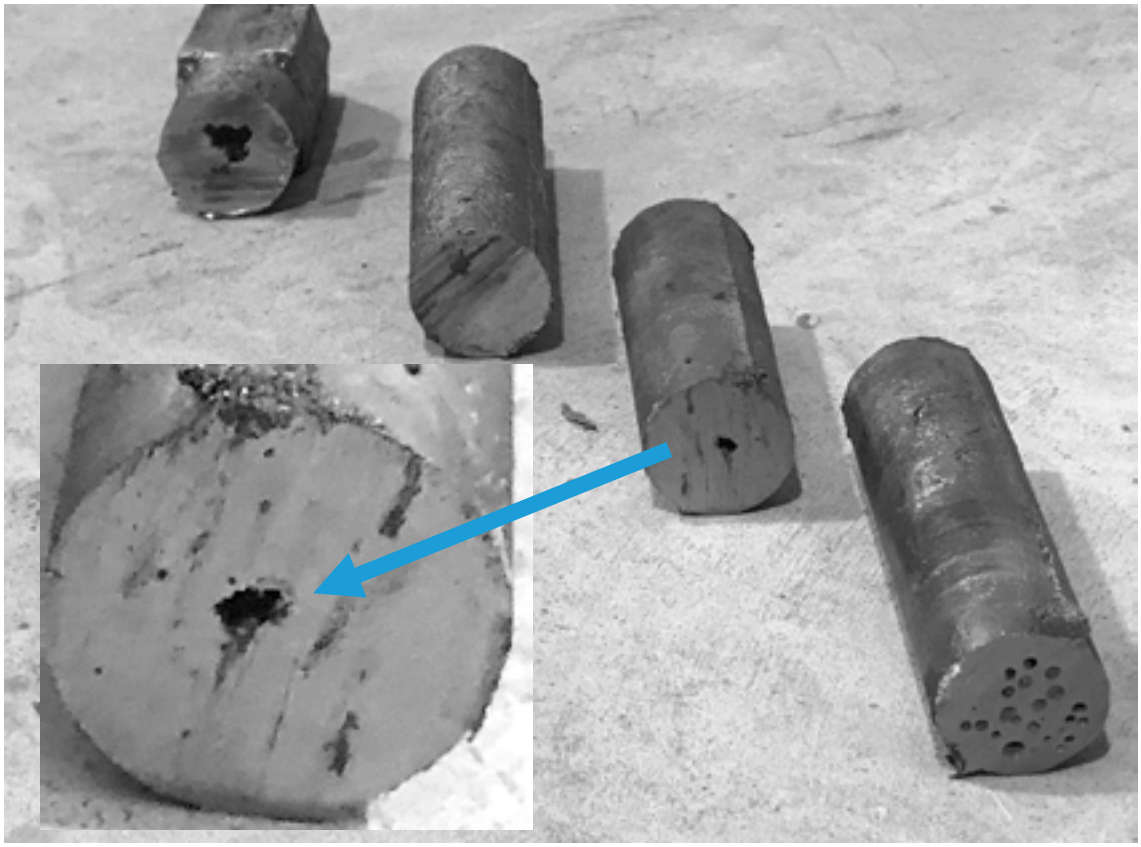
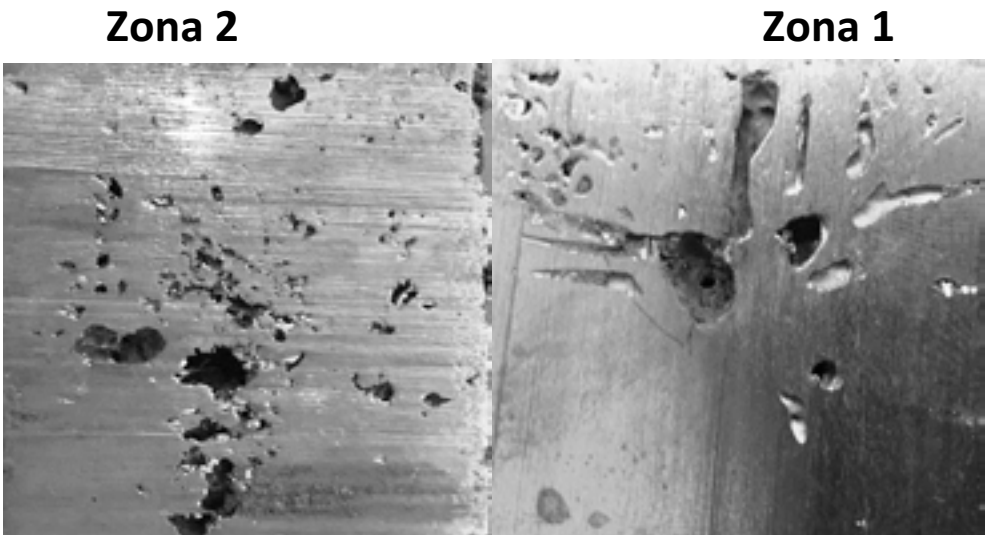


Figura 2.- Ensayos de fusión y colado de Manganina en molde de arena, con mayores contenidos de desoxidante

Se realiza un tercer ensayo utilizando un molde de hierro, el cual está a temperatura ambiente al momento del llenado. El objetivo de este ensayo es valorar el desempeño de una menor cantidad de desoxidante, y además eliminar cualquier contribución de gases provenientes del molde. Se utiliza un dosaje de Magnesio de 8 gramos por cada kilogramo de aleación

El análisis de la estructura interior se hace a través de cortes en regiones similares a las ya estudiadas (ver Figura 1); el primer corte analiza la sanidad del material en la región donde ingresa el primer líquido (zona 1) y otro, en el extremo opuesto o sea en la región de ingreso del último líquido (Zona 2); este último corte permite estudiar el efecto el montante en la alimentación de la pieza y la limpieza del último líquido a solidificar. Los estudios de los permiten inferir que todas las medidas correctivas no pudieron evitar que se formen cavidades. El estudio del primer liquido (Zona 1 de la Figura 3) muestra rastros de cavidades de gas, orientadas en la dirección de avance del frente de

solidificación. En la zona 2, ya hay una mezcla de cavidades de contracción y porosidad. Esto indica que el contenido de Magnesio utilizado no es suficiente para eliminar óxido de cobre, y además que la solidificación dirigida aplicada en el molde de hierro, no elimina el fuerte efecto que tiene la contracción volumétrica



Se realiza un cuarto ensayo aplicando las siguientes consideraciones: por una parte, se aumenta la cantidad de desoxidante (15 gramos de Magnesio por kilo de aleación). se utiliza nuevamente el molde de arena con la entrada hacia arriba, colocándolo en posición próxima a la horizontalidad para permitir un llenado suave y sin turbulencias. Se duplica el volumen del montante Se vuelve a cortar la pieza para estudiarla en las mismas zonas que las anteriores. El resultado es bueno ya que no se encuentran rastros de poros ni cavidades de contracción; la superficie retiene las asperezas típicas de un molde en arena y el montante fue más que suficiente para eliminar la contracción del último punto caliente

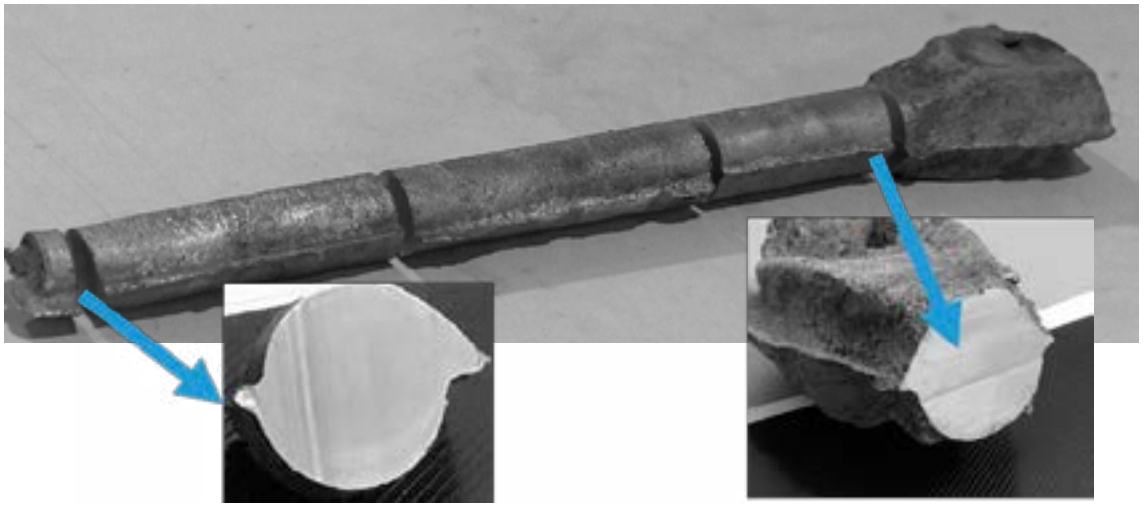


Figura 4.- Ensayos de fusión y colado de Manganina en molde de arena, con mayores contenidos de desoxidante, molde en posición quasi-horizontal. Los cortes muestran la

CONCLUSIONES

Finalmente, este trabajo experimental demuestra que es posible realizar el proceso de fabricación de la aleación MANGANINA utilizando técnicas convencionales de fusión y colado.

Durante el desarrollo de la aleación, se logró el control de los defectos más importantes que aparecen en las aleaciones base cobre, como son los gases disueltos en el baño líquido ya que estos finalmente forman porosidad y degradan la calidad del fundido. Después de varios escenarios de desgasificación, se comprobó que utilizando cantidades mínimas de Magnesio (15 gramos por kilogramos de aleación) se restringe la formación de poros. Las pérdidas en el metal líquido se minimizan controlando la atmósfera del horno y las temperaturas de trabajo mientras que la formación de escoria se controla restringiendo la agitación magnética del horno.

BIBLIOGRAFIA

- ASM Handbook: Casting, v.15, Metals Park, Ohio, 1988, pp.464-451.
- Source Book on Copper and Copper Alloys. American Society for Metals (ASM), Metals Park, Ohio 44073, section VIII, p.124-131, 1979.
- Wallace, J.F, Kissling, R.J. Gases in Copper-Base Alloys, part 2, Foundry, January 1963,pp64-68.
- Trojan, P.K, Ostrom, T.R, Flinn, R.A, Melt Control Variables in Copper-Base Alloys, AFS Transactions, pp.82-168.
- R.A.Flinn, Fundamental of metals casting (Addison Wesley Publishing Co., 1963)

DESARROLLO DE UN PROCESO FABRICACIÓN A PARTIR DE LA RECUPERACIÓN DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO, ORIENTADO A LA PRODUCCIÓN DE MADERA PLÁSTICA, EN EL MARCO DE LA CREACIÓN DEL CENTRO INTERINSTITUCIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA ECONOMÍA POPULAR, SOCIAL Y SOLIDARIA (EPSS)

Álvarez Cecilia S.[1,2], Castelló Ma. Emilia[1], Diaz Pablo G., Di Marco Josefina, Elgueta Garnica Carlos D., Galache M. A. Ramón[1,3], Gianni Esteban, Mansilla Nicolás, Massolo Miranda, Ruiz Díaz Fernando E.[1,2], Saralegui Gustavo D.[1,3]

[1]Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Calle 48 y 117, La Plata. [2]UIDET ProInTec. [3]UIDET IAME ramon.galache@ing.unlp.edu.ar

Introducción

En el marco del programa “Construir Ciencia” del Consejo Interinstitucional de Ciencia y Tecnología – Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación, se crea el Centro Interinstitucional para el Desarrollo de la Economía Popular, Social y Solidaria (CIDEP) dependiente de la UNLP/CIC/CONICET, cuya ejecución se encuentra en desarrollo.

El CIDEP se propone funcionar no sólo como un espacio de abordaje de temas tecnológicos, sino como incubadora de las unidades productivas, porque sumará equipos de diferentes disciplinas que aporten a la organización del trabajo, el cálculo de costos, el marketing y el estudio de mercados.

El Consejo Social de la UNLP, en el año 2021, a partir del trabajo sostenido junto a organismos de ciencia y tecnología, crea una mesa de trabajo entre áreas de la UNLP, el Conicet La Plata, la CICpBA, referentes municipales y de organizaciones sociales, para comenzar a diseñar líneas de trabajo que vinculen las necesidades y potencialidades de la EPSS con los desarrollos científicos y tecnológicos de estos organismos.

Dentro de las líneas priorizadas en esta etapa se encuentran los Desarrollos vinculados a:

1. Residuos recuperados con escaso valor o sin mercado, incorporando también líneas de aprovechamiento de residuos orgánicos, en su cadena de valor;
2. Mejoras en el hábitat popular a partir del uso de materiales, energías y tecnologías alternativas, y sus encadenamientos productivos;
3. La producción de alimentos frescos, con agregado de valor y/o de alto valor nutricional; y
4. La incorporación de tecnologías digitales basadas en Internet en la producción y comercialización de bienes y servicios de la EPSyS.

En virtud de lo desarrollado, se propone realizar un proyecto piloto de reutilización de plásticos de un solo uso, orientado a la producción de madera plástica. Esto surge en el proceso de recuperación de residuos sólidos urbanos a partir de la necesidad de los integrantes de las cooperativas de recuperadores urbanos de introducir valor al plástico recuperado. En general la venta de los plásticos separados en polietileno (PE) en baja densidad (LDPE) y alta densidad (HDPE), poliestireno (PS), y cloruro de polivinilo (PVC), se realiza por bolsón de un metro cúbico y con costos de traslado elevados debido al volumen que ocupa. Esto representa un problema ya que el valor de venta se encuentra fijado a partir del peso del material recuperado y la calidad de está asociada a la clasificación, tanto por la pureza, como la limpieza y el color.

El diseño y escalado de la producción de madera plástica, está previsto en las naves industriales del CIDEP. Aquí se realizarán los diseños y desarrollos, ensayos, la formación del personal, y se seleccionarán los métodos en las que se llevarán adelante los procesos productivos.

Los productos que se proponen desarrollar a partir del procesamiento del plástico se distinguen por emplear materiales y métodos sencillos para su fabricación. La producción de madera plástica atiende a uno de los beneficios del proceso productivo planteado, que es obtener subproductos que permiten vender volumen de material reciclado incluso antes de realizar los ensayos finales.

El proceso de fabricación genérico que se adoptará será el de extrusión, por ser el más difundido de los procesos de fabricación para termoplásticos, el más económico, desde el punto de vista del costo operativo y la inversión, y técnicamente adecuado para el tipo de producción, sin dejar de mencionar la su simplicidad frente a otros procesos más complejos como el de inyección, y también frente a este último, un mejor resultado en la utilización de materia prima reciclada, tanto del punto de vista de la máquina como del producto a obtener

Para este proceso con características de piloto, son necesarios tres equipos básicos que permiten el ciclo completo del procesamiento; un molino triturador para el chipeado primario del plástico, especialmente todo tipo de termoplásticos duros; una agrumadora para el tratamiento de los termoplásticos de baja densidad (bolsas) con el objetivo de agrumarlos creando un material más denso capaz de ser triturado como el promedio de los plásticos de alta densidad; y como unidad de fabricación, un tornillo extrusor con capacidad suficiente para la demanda productiva. Con estos equipos, y con procesos complementarios sobre la clasificación y la limpieza del insumo, será posible trabajar interrelacionadamente con más de una organización, pero lo más significativo es el alcance tecnológico de los desarrollos, ya que con el trabajo interdisciplinario en equipo con miembros de las unidades académicas, grupos y centros de la universidad que entiendan sobre cuestiones de diseño, fabricación, materiales, etc., se pueden lograr productos resultantes sencillos pero efectivos como monofilamento para impresión 3D, perfiles para múltiples usos como carpintería plástica para mobiliario urbano, juegos de plaza, aplicaciones específicas como pilares de electricidad, etc., como los esquematizados en la figura 1.



Figura 1. Madera plástica, apariencia y aplicaciones

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de un proceso piloto de producción de madera plástica a partir de plástico de un solo uso, recuperado por las cooperativas de recuperadores urbanos, a fin de desarrollar la cadena de valor a dicho material hoy no aprovechado.

Se busca particularmente:

- Evaluar y caracterizar los materiales producidos por la recolección y posterior clasificación de estos por parte de las organizaciones de RRSU, identificando aquellos

termoplásticos que se conocen vulgarmente como “de un solo uso”, siendo que los mismos no pueden ser comercializados ni introducidos a las cadenas de valor habituales.

- Estudiar y analizar las posibles mezclas y aditivos que permitan los materiales disponibles para, posteriormente realizar pruebas en laboratorio, y con las muestras obtenidas, realizar ensayos para la caracterización del material sólido.
- Seleccionar, dentro de los procesos de fabricación convencionales, la técnica específica para el tratamiento de los materiales disponibles, las mezclas a realizar y el producto a obtener, en cuanto a formas y volumen.
- Seleccionar el equipamiento requerido, dentro de la oferta existente en el mercado, a partir del análisis de las especificaciones técnicas emitidas por los fabricantes.

Desarrollo

En tal sentido del marco teórico expuesto, se establecen como requisitos necesarios para el desarrollo de la experiencia, el siguiente conjunto de premisas y acciones a concretar:

1- Relevamiento de tipos y volúmenes de materiales plásticos recuperados y su destino final. A través de encuentros con las organizaciones dedicadas a la RRSU, y visitas a los centros de recolección, separación y acopio, se evalúa con una matriz predeterminada, tipos y volúmenes de los residuos plásticos. Hasta el momento se determinaron parcialmente los tipos de materiales, restando la tarea de cuantificar la matriz en volumen y otras características que servirán para especificar los procesos, como caracterización del material respecto a contenido de suciedades y el tratamiento adecuado de limpieza, y clasificación por color para la homogeneización de la masa plástica.

2- Análisis de los datos del material relevado. Se realizará un análisis cualitativo y cuantitativo de los materiales con el objetivo de identificar posibles mezclas, ponderando plásticos de un solo uso y plásticos cuya capacidad de reciclaje permiten ser comercializados para integrar otras cadenas de valor. Para esta etapa se está interactuado con desarrolladores privados de la industria plástica de probada experiencia que se suman al proyecto en calidad de aportes en el marco de responsabilidad institucional sobre proyectos de características verdes.

3- Desarrollo de mezclas adecuadas para el propósito objeto. Determinar, en base a los materiales disponibles, aquellas mezclas y ligantes, que alcancen las especificaciones técnicas que cumplan con las características del producto a obtener. Se realiza la caracterización de los materiales a través de ensayos y pruebas. Se estudia la incorporación de cargas vegetales en la mezcla, que posiblemente aprovechen el residuo del Centro Tecnológico de la Madera (CTM) de la UNLP, con el objeto de cerrar el ciclo de tratamiento de residuos y optimización de los procesos.

4- Evaluación y selección de la tecnología de fabricación adecuada, especificación de equipos y factibilidad de provisión. Esta etapa se desarrolló desde el inicio a partir del conocimiento de los tipos de materiales relevados. A partir de estos datos se puedo determinar un proceso básico ilustrado en el esquema de la Figura 2 que permitió realizar la especificación técnica de los equipos necesarios para la realización de la experiencia a escala piloto, con las consideraciones de escalabilidad pertinentes, y también la elaboración de una propuesta de layout acorde al proceso.



Figura 2. Esquema de flujo de proceso.

Resultados

En esta primera etapa se avanzó parcialmente con las actividades propuestas en 1,2 y en un avance profundo de la etapa 4. Por último, de forma parcial y en una etapa de avance inicial, dado que está condicionado por el avance de los resultados y el tiempo de la investigación, la actividad 3.

A modo de establecer los resultados obtenidos de forma concreta, a continuación, se muestran los avances de la etapa 4.

Para ello se estableció un criterio preliminar para el tratamiento de los materiales citados en la introducción, a saber: polietileno (PE) en baja densidad (LDPE) y alta densidad (HDPE), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y la inclusión de politereftalato de etileno (PET), con especial consideración por los primeros, que son conocidos en la jerga como plásticos flexibles, de los cuales existen en mayor abundancia que otros y requieren un proceso de agrumación para optimizar su molienda, previa carga al extrusor donde ocurre la plastificación.

Los tipos de materiales y su predominancia en el contenido de los materiales recuperados se relevan a partir de los testimonios de los propios cooperativistas.

Para determinar las especificaciones técnicas de los equipos a utilizar para la experiencia piloto, se tuvo en cuenta el volumen y tipos de plásticos a procesar, el tipo de plastificación a realizar (parámetros de tornillo), predominancia y tipo del material que justifica el proceso de agrumación (predominancia de PE) previa al ingreso de la tolva del extrusor, y paralelamente molienda del plástico duro en el tornillo.

De allí se obtienen las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 1: tornillo extrusor

Capacidad de procesamiento [kg/h]	40
Diámetro tornillo [mm]	60
Largo tornillo [mm]	2000
Potencia [kW]	7,45

Tabla 2: Agrumadora

Capacidad de procesamiento [kg/h]	50
Potencia [kW]	18,6

Tabla 3: Molino triturador

Capacidad de procesamiento [kg/h]	100-300
Potencia [kW]	7,5

A partir de los datos especificados se adquirieron los siguientes equipos: molino triturador marca Jinhengli (Figura 3) para el chipeado primario del plástico, especialmente todo tipo de termoplásticos duros; Agrumadora marca Industrias Elypson (Figura 4) que permite la densificación de los termoplásticos de baja densidad (bolsas) para su posterior chipeado; y como unidad de fabricación, un tornillo extrusor marca Industrias Elypson (Figuras 5 y 6). Tanto la agrumadora como el tornillo extrusor son equipos de fabricación nacional.



Figura 3. Chipeadora



Figura 4. Agrumadora



Figura 5. Extrusora similar a la adquirida

Con respecto al layout de planta (Figura 6), se trabajó en una propuesta de esquema típico que contempla la instalación de las máquinas especificadas de acuerdo con el flujo de planta propuesto en la Figura 2, el acopio de la materia prima y del producto, y la potencial instalación de un proceso de lavado y centrifugado de la materia prima, a desarrollarse en una etapa futura del proyecto.

Correlativamente se calculó y especificó la potencia aparente requerida aproximada para alimentar la planta, estimada en 50 kVA.



Figura 6. Layout esquemático

Conclusiones

A partir de la finalización de la obra del edificio donde funcionará el CIDEP, se instalarán allí los equipos adquiridos con los requerimientos de potencia especificados, que permitirán el

desarrollo del modelo de planta piloto y se comenzará con las pruebas de producción, dónde se espera obtener:

- Proporción de mezclas / compuestos de plásticos con carga orgánica.
- Ensayos químicos y mecánicos sobre la mezcla lograda
- A partir de determinar una mezcla óptima, desarrollo de la etapa de fabricación.
- Desarrollada la etapa de fabricación, desarrollo del proceso productivo.

Al mismo tiempo, resta avanzar en el desarrollo de la matriz de materiales y volúmenes producidos por la recolección a determinar con una más profunda interacción con las organizaciones de RRSU. Esto hace necesario avanzar con otro proyecto asociado relacionado a la clasificación cualitativa del universo de materiales que permitan a las organizaciones un proceso interno de calidad para mejorar su aporte en la cadena del plástico y al mismo tiempo determinar con mayor precisión los volúmenes a procesar en su cadena interna.

Bibliografía

Carrión Nin, J. (2000). Procesos de fabricación de productos plásticos. Industrial Data, 3(1), 06–08. https://doi.org/10.15381/idata.v3i1.6568

Influencia de las propiedades de la materia prima en el desempeño del proceso de extrusión. Antonio Jiménez Ramos, Juan Francisco Puerta Fernández, Julio Rafael Gómez Sarduy, Yulier Jiménez Santana. Ingeniería Energética 2019, XL (1) https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329164315009.

Mantovani, G. A., Oliveira, J. H., Santos, A., Rinaldi, A. W., Moisés, M. P., Radovanovic, E., & Fávaro, S. L. (2017). Mechanical recycling of tags and labels residues using sugarcane bagasse ash. Polímeros, 27(1), 8–15. https://doi.org/10.1590/0104-1428.2278

Manufactura, ingeniería y tecnología / Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid - 4a. ed. - México Pearson Educación, 2002. - 1152 p. ISBN: 9702601371.

Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades / Maribel Beltrán Rico; Antonio Marcilla Gomis. - San Vicente de Raispeg: Universidad de Alicante, 2012. - 273 p. ISBN: 9788497172325.

ARTICULACIÓN VERTICAL ENTRE GRÁFICA PARA INGENIERÍA, MATERIALES Y TECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN II: LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Castelló Ma. Emilia[1], Castellani Lisandro A.[1], Lopresti Laura A.[1,2], Gavino Sergio J. L.[1,2], Rondán P. Valentín, Ruiz Díaz Fernando E.[1,3], Sánchez Marcelo A.[1]

[1]Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Calle 48 y 117, La Plata, emilia.castello@ing.unlp.edu.ar; [2]UIDET GIGA, laura.lopresti@ing.unlp.edu.ar; [3]UIDET ProInTec

Introducción

En el marco de la Cátedra Tecnología para la Fabricación II, desde hace tres semestres se lleva a cabo un laboratorio práctico de fundición de aluminio, diseñado para reforzar los conocimientos adquiridos en clase y poder articular verticalmente los contenidos de otras materias.

Esta iniciativa surge a partir de la necesidad de reforzar la realización de laboratorios y la articulación entre materias de la carrera, vertical u horizontalmente. Un enfoque curricular cohesionado, entre otras cosas, hace visibles los nexos entre conocimientos generales y especializados.

En base a esto, se refuerza la motivación para fomentar la articulación entre materias. La propuesta realizada se basa en dos principios del aprendizaje, los cuales son considerados como básicos [Zabalza, 2012]: el primero indica que el aprendizaje mejora si las y los estudiantes son capaces de establecer redes; es decir, aprender relacionando. El segundo principio indica que el aprendizaje mejora si las y los estudiantes son capaces de dar sentido a las cosas que estudian; es decir, saber para qué sirve o a qué se aplica lo que están aprendiendo.

Uno de los problemas fundamentales de los currículos es que provocan aprendizajes que se estructuran en campos similares a aquellos desde los que se ha tomado contacto con ellos. En los modelos disciplinares, los estudiantes tienden a organizar sus conocimientos por disciplinas (a veces en sub-disciplinas, si han sido varios los profesores que han participado en su desarrollo, cada uno de ellos generando su propio y diferente campo informativo y de prácticas), en archivos separados unos de otros. Es importante enseñar de forma que el primero de los principios mencionados se cumpla: plantear las cosas relacionándolas unas con otras, hacer visibles las conexiones, de todo tipo, existentes entre unos contenidos y otros. Si se hace así, la natural tendencia centrípeta de contenidos y actividades se diluye y se va abriendo espacio a la posibilidad de transferir conocimientos y destrezas de unos campos a otros [Cozzarín, Trípoli, Feloy, 2021].

Las y/o los docentes tienen que comenzar por construir la relación entre el conocimiento nuevo y lo ya sabido, aunque es mejor que sea el conjunto de profesores el que la construya [Camilloni, 2001]. Dar clases representa un acto apasionado (Piaget) a modo de donación, de entrega generosa [Berisso, 2015]. No pretende un retorno objetivable, sino que consiste en una entrega que apunta a movilizar al otro a que abra su propia perspectiva. La práctica de enseñanza no es azarosa, es intencional.

El primer semestre que se realizó esta actividad se trabajó articulando las materias Materiales (3er semestre de la carrera) y Tecnología para la Fabricación II (7mo semestre de la carrera). Al notar las dificultades en el relevamiento de piezas y representación de plano durante el

proceso del laboratorio, surge la necesidad de invitar a otras cátedras a participar de la actividad, en particular a Gráfica para Ingeniería (1er semestre de la carrera).

Desde la cátedra de Gráfica para Ingeniería, se intervino en el proceso de laboratorio tras identificar dificultades en el relevamiento de piezas y la representación de planos.

Durante el paso de los semestres, participaron otras cátedras de las carreras, aportando conocimientos y conceptos de piezas utilizadas para relevar, realizar planos, modelar, realizar moldes y participar del proceso de colada para su obtención. Las piezas generadas en el laboratorio de fundición de aluminio debían ser concebidas con un enfoque práctico, aprovechando el proceso para producir elementos con aplicaciones concretas.

Esta iniciativa surge desde Tecnología para la Fabricación II pero, con el transcurso de los semestres, se transformó en una actividad coordinada conjuntamente con la cátedras Gráfica para Ingeniería y Materiales.

Desarrollo, resultados y discusión

La actividad se constituye de varias etapas entre las que se encuentra la conformación de grupos de trabajos, presentación de piezas, relevamiento y croquizado, realización de planos, modelado 3D, fabricación de moldes, colada y extracción de piezas e informe.

Las piezas utilizadas fueron proveídas por la cátedra Automotores y Máquinas Agrícolas (10mo semestre de la carrera) donde se trabajó con suplementos de suspensión para autos de competición, y por Gráfica para Ingeniería quien utilizó piezas didácticas con el propósito de generar material didáctico para sus clases prácticas.

Luego de una primera etapa de croquizado y trabajo en grupos (figura 1), se identificaron diversas dificultades en el relevamiento y la representación de las vistas de las piezas. Entre ellas, se destacan la falta de criterio en la representación técnica, el uso excesivo e innecesario de acotaciones, y la ausencia de referencias, ejes y centros de círculos, elementos clave para una mejor comprensión de la forma. Es por ello que, con el objetivo de brindar un acompañamiento más integral, un docente de Gráfica para Ingeniería asistió a las clases en dos ocasiones, realizando un seguimiento de los croquis y planos, orientando sobre la toma de medidas, la representación precisa y la correcta aplicación de las normas IRAM. Se trabajó sobre la normalización gráfica según estándares nacionales, el uso adecuado de escalas y tipos de líneas, y la aplicación del sistema de representación de Monge para la proyección ortogonal y la generación de vistas principales, secciones y cortes. También se abordaron los acuerdos sobre acotamiento, así como las tolerancias dimensionales y geométricas, fundamentales para garantizar la precisión en la manufactura.



Figura 1. Trabajo áulico: dimensionamiento de piezas.

Posteriormente se trabajó en la generación de planos a partir de modelos digitales, priorizando la claridad en la documentación técnica. Como parte del proceso, se realizaron correcciones sobre los planos, se devolvieron con observaciones y se hizo un seguimiento detallado de las modificaciones implementadas, asegurando su correcta aplicación hasta la fabricación del modelo para fundición. Estos conceptos fueron luego retomados en los espacios de la materia Tecnología, consolidando la integración de conocimientos gráficos en el proceso de manufactura.

Una vez finalizada la etapa de relevamiento de piezas, se obtuvieron los modelos en 3D para luego realizar el molde y poder obtener las piezas trabajadas (figura 2). Cabe destacar que el estudiantado utilizó diferentes softwares para la realización del modelo tridimensional permitiendo unificar criterios en la representación de la información técnica independientemente de las herramientas utilizadas. En cambio, los modelos para la fundición se realizaron con impresión 3D con equipamiento de las cátedras involucradas considerando los parámetros de contracción de la pieza posteriormente fundida y la contracción que sucede durante la impresión 3D.



Figura 2. Piezas y modelos 3D

La etapa de moldeo (figura 3) se llevó a cabo en las instalaciones del ProInTeC y estuvo a cargo de docentes de la cátedra de Tecnología junto a docentes de la cátedra Materiales. Allí, los alumnos fueron guiados durante la elaboración de los moldes, repasando conceptos como contracción durante la solidificación, canal de colada, ataques, cálculos de montantes, temas que pertenecen al programa analítico de tecnología para la fabricación.



Figura 3. Moldeo de piezas

Por último, se realizó el proceso de colada y, luego de la solidificación del material, se procedió a desmoldar las piezas y limpiarlas, acondicionando para el uso planteado (figura 4).



Figura 4. Colada y desmolde

Finalizadas las etapas del laboratorio, se realizó la invitación al grupo de estudiantes para realizar una encuesta optativa con la finalidad de mejorar esta experiencia, donde se hicieron preguntas sobre articulación entre cátedras, arrojando los resultados presentados a continuación.

- El 92% de las y los estudiantes nunca tuvieron una actividad de articulación entre materias.
- El 80% cree que es importante que se realicen este tipo de actividades.
- El 90% respondió que le gustaría participar de más actividades de articulación.
- Si tuvieras que calificar la actividad, dirías que fue (podes marcar más de una): al 4% le resultó pesada; al 36% estimulante, el 72% dijo que era interesante, el 4% mencionó que fue aburrida, al 24% le resultó extensa, mientras que al 8% le pareció corta.

Por último, se preguntó qué aspectos de la actividad les resultaron más útiles o valiosos, donde en general los comentarios fueron similares. Algunas de las respuestas recibidas fueron:

- Theo “Prácticamente todo fue útil y valioso, desde hacer relevamiento de la pieza hasta el momento de tener la fundición lista”.
- Facundo “La realización práctica del procedimiento, yo considero que uno aprende mucho más aplicando la teoría a la realidad.”
- Tomás “Llevar los conceptos teóricos a la práctica en el laboratorio, todo hecho por nosotros mismos”
- Marco “Poder trabajar con el laboratorio la universidad, poder usar contenido teórico de la materia en una actividad real”
- Felipe “el poder aplicar distintos conocimientos, previos o actuales, en un proyecto real, pudiendo así, obtener un resultado tangible. Además, la elaboración por nosotros mismos resulta interesante y estimulante”
- Agustina “En mi opinión, lo mejor fue el trabajo en el laboratorio, en el ProInTec, ya que no había tenido la oportunidad antes de participar de esa manera, y uno puede ver y participar en la fabricación una pieza”
- Federico “Salir un poco de lo teórico y meterse en experiencias que ocurren en el ámbito profesional”

- Paco “Compartir problemáticas y soluciones vividas respecto a la actividad y fomentar el debate de posibles soluciones”

Conclusiones

El objetivo inicial de la propuesta era motivar al grupo de estudiantes en el aprendizaje, pudiendo llevar a cabo el proceso real de fundición. Al encontrarnos frente a las dificultades mencionadas, a este objetivo se incorpora la vinculación de las diversas áreas disciplinares.

Creemos que una de las causas por las que encontramos estas dificultades pueden deberse a la brecha temporal que existe entre materias, Gráfica para Ingeniería corresponde al primer año de la carrera, mientras que Tecnología es del cuatro año. Además, factores como la tendencia del estudiantado a concentrarse en los contenidos puntuales para los exámenes y la falta de continuidad en prácticas integrales que vinculen los conceptos a lo largo de los años de cursada de la carrera, contribuyen a que las dificultades en el relevamiento y la representación de las piezas persistan.

Consideramos que el objetivo fue cumplido y la mayoría de las y los estudiantes consideraron positiva la propuesta y lo manifestaron en clase y a través de la encuesta que se realizó.

Seguiremos trabajando en esta propuesta y que otras necesidades respecto de competencias involucradas en el desarrollo de la profesión pueden abordarse en experiencias similares, para generar motivación en otros docentes y hallar conexiones implícitas entre materias para enriquecer la formación de las y los estudiantes.

Bibliografía

Camilloni A. (2001). Aportes para un cambio curricular en Argentina 2001. Secretaría de Asuntos académicos, UBA. I.S.B.N. 950-710-071-7

Berisso D. (2015). ¿Qué clase de dar es dar clase?. Editorial Antropofagia.

Cozzarín A., Trípoli M., Feloy L. (2021). Articulando mate(riales)a. VI Jornadas ITEE. 14 – 16 de septiembre de 2021, Facultad de Ingeniería. ISBN 978-950-34-2049-2

Zabalza M.A. (2012). Articulación y rediseño curricular: el eterno desafío institucional. Revista de Docencia Universitaria. REDU. Vol. 10 (3) Octubre-diciembre, pp. 17-48 http://www.red-u.net/

FOTOGRAMETRÍA Y MODELADO 3D PARA EL REGISTRO DOCUMENTAL DEL PUENTE PATRIMONIAL DONATO GERARDI

Lopresti, Laura*; Gavino, Sergio*; Speroni, Lucas*; Defranco, Gabriel*; Fuertes; Laura*
*UIDET Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada, Dpto. de Mecánica, Facultad de Ingeniería - UNLP, Calle 48 y 117, La Plata
lfuertes@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Este trabajo es una versión abreviada del artículo publicado en la Revista Brasileira de Expressão Gráfica, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 026–047, 2024; en el cual se relata el relevamiento fotogramétrico y posterior reconstrucción de un modelo tridimensional del Puente Donato Gerardi ubicado en la localidad de Manuel B. Gonnet, La Plata, Argentina. Primera obra de hormigón armado en el país fue construida por el mencionado Ingeniero en 1916 y a partir de 2018 integra el patrimonio histórico y cultural del municipio. Para el relevamiento, se empleó una técnica fotogramétrica de bajo costo y en la reconstrucción digital se incorporaron técnicas de modelado 3D a través de un software paramétrico. Las acciones relatadas tienen como propósito la obtención de un modelo digital que permita, a posteriori, la difusión de este bien patrimonial.

Palabras clave: PUENTE, FOTOGRAMETRÍA, PATRIMONIO HISTÓRICO-CULTURAL, MODELO 3D.

1 Introducción

El Puente Donato Gerardi se encuentra en el kilómetro 4,425 de la actual Ruta Provincial Nº 1, también conocida como Camino General Belgrano, que conecta la ciudad de La Plata con la ciudad de Buenos Aires. Inicialmente diseñado para atravesar la ruta del ferrocarril La Plata - Brandsen, en lo que constituía el "Camino afirmado La Plata-Avellaneda", actualmente y debido al levantamiento de las vías, no solo se utiliza para su función original, sino que también sirve como conexión, por debajo, para una importante avenida de la ciudad (Av. 19), siguiendo una trayectoria sinuosa.

En el año 2018 es declarado de interés municipal, reconociéndolo como parte del Patrimonio histórico y cultural del partido de La Plata mediante el decreto Nº 25 del Concejo Deliberante. Entre las diversas iniciativas destinadas a difundir esta obra, es de destacar la conferencia impartida por el Ingeniero Luis Lima, ex rector de la Universidad Nacional de La Plata, titulada "Puente Donato Gerardi: un puente patrimonial de hormigón armado al servicio durante 90 años" y en el 2016, el arquitecto Enrique Ferrari, especializado en puentes, organizó una exposición fotográfica titulada "Puentes de la Región", presentando posteriormente, un proyecto de ley en la Legislatura de la provincia de Buenos Aires para que se declare esta construcción como "Monumento Histórico Provincial".

Originalmente esta obra fue encargada a una empresa de origen belga y diseñada para ser construida en metal. El contexto de la guerra en Europa en el año 1914 hizo que el material previsto inicialmente para su realización ganara valor estratégico y por lo tanto escaseara, incrementando su precio para nuestro país. Ante esta situación la Dirección de Hidráulica, Puentes y Caminos solicitó al Ingeniero Civil Donato Gerardi el diseño de un puente en arco de "cemento armado"[1] (GERARDI, 1916). La construcción tuvo lugar entre los meses de octubre de 1915 y mayo de 1916, cumpliendo con los plazos estipulados y dentro del presupuesto asignado.

[1] Se ha empleado la expresión original tal como aparece en el material relevado.

El Ingeniero Donato Gerardi (1886-1962) era de origen italiano y se graduó en 1910 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (Figura 1). Trabajó en la Dirección de Hidráulica, Puentes y Caminos del Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires, donde eventualmente ocupó el cargo de director. Simultáneamente, ejerció como docente en la actual Facultad de Ingeniería, antes conocida como Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), donde desarrolló su labor como profesor en las materias de Caminos y, posteriormente, de Ensayo de Materiales.



Figura 1 – Ing. Donato Gerardi.
Fuente: imagen de uso público

Como ya se ha mencionado, estuvo a cargo del proyecto de construcción del puente, y su contribución quedó plasmada en las memorias de la obra recopiladas en el libro titulado "Camino Afirmado de la Plata a Avellaneda" (GERARDI, 1916). Además, fue el primer presidente del Consejo Profesional de la Ingeniería. En 2008, fue declarado ciudadano ilustre por la ciudad de La Plata. A raíz de su fallecimiento, quienes compartieron días de trabajo con él expresaron su sentir en la revista de Vialidad Nº20 con las siguientes palabras:

> *La vialidad argentina pierde con el Ingeniero Gerardi una figura señera de sus comienzos, un precursor que afianzó el nacimiento vial con la construcción (1912-1916) del primer camino de largo avento del país, la Ruta Nacional Nº1, camino General Belgrano, entre La Plata y Avellaneda, para cuyo planeamiento y ejecución fue llamado, afrontando la responsabilidad de fiscalización del trazado y la proyección de costosas obras de arte. Vialidad (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 1962)*

Con este marco y dada la importancia de este bien patrimonial, se ha tomado la decisión de emprender acciones para difundir tanto la obra como la figura de su ejecutor. De este modo, se ha comenzado esta tarea iniciando la búsqueda de documentación, con el propósito de crear un modelo 3D y eventualmente publicarlo en un repositorio virtual[2]. La técnica de relevamiento seleccionada para este proyecto es la de fotogrametría de bajo costo, específicamente asociada con la técnica de *Structure from Motion* (SfM), una metodología eficiente que utiliza fotografías para generar datos tridimensionales. Tras la captura de las imágenes, se realiza el procesamiento fotogramétrico a través de software específico. Durante esta fase, se emplean algoritmos y técnicas avanzadas para analizar y correlacionar las imágenes dando como resultado la creación de un modelo digital que se convierte en una representación tridimensional y constituye una representación virtual del objeto real relevado. Aunque la precisión métrica ha sido difícil de determinar, este método permite un modelado parcial suficientemente proporcionado del puente.

A través de la recopilación de información técnica detallada sobre la estructura, como dimensiones, formas y detalles arquitectónicos, se enriquece al modelo 3D para reflejar con mayor precisión las características del puente. Este proceso integral, desde la captura de las imágenes hasta la construcción del modelo 3D, contribuye a preservar digitalmente este patrimonio cultural y facilita su difusión, estudio y aprecio por parte de la comunidad. Cabe mencionar también que este trabajo forma parte del Proyecto PID UNLP 11/I274 *Técnicas de relevamiento de bajo costo, modelado paramétrico e impresión 3D para la producción de modelos digitales y materiales. Aplicaciones en el patrimonio cultural material, en ingeniería inversa y en la enseñanza de los sistemas de representación.*

[2] Será publicado en el repositorio de la UNLP actualmente se está implementando. https://datos.unlp.edu.ar

2 El Puente Donato Gerardi

El proyecto original consideraba una longitud de 32 m con una estructura metálica con vigas principales de tipo parabólico. Este diseño prescindía de contraventamientos superiores y contaba con montantes reforzados. Pero debido a la reproyección de la estructura del puente para adaptarse al cambio de material, la estructura de hormigón armado resultante adopta la forma de un arco de circunferencia cuyo eje tiene un ángulo de 72° 08´ con el eje del camino (oblicuo). Se trata de un puente triarticulado con un tablero superior, presentando una luz entre los apoyos de 27,50 m y una flecha de 3,10 m (Figura 2). El ancho total del puente es de 6 m, coincidiendo con la amplitud del camino, y cuenta con veredas de 1 m a cada lado. Estas veredas están delimitadas por una baranda de hormigón armado con aberturas que contribuyen a reducir el peso de la estructura. La altura total entre las vías del ferrocarril (actualmente en desuso) y la parte inferior (intradós) del arco del puente es de 5,50 m.

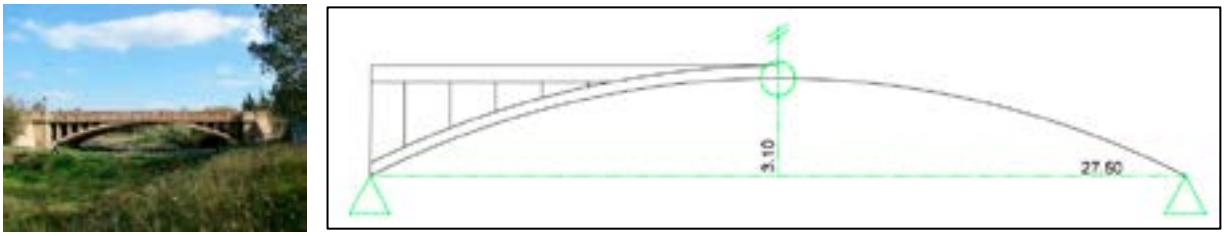


Figura 2 – Imágenes del puente y esquema de arco triarticulado con dimensiones generales.
Fuente: de los autores

El perfil de la calzada es horizontal en la dirección transversal y presenta una inclinación del 1% en la dirección longitudinal (GERARDI, 1916).
Actualmente el mantenimiento del puente se ve dificultado por el establecimiento de personas en situación de calle quienes han intervenido la estructura cerrando los espacios entre las columnas, como se puede apreciar en las imágenes capturadas en el 2018 y 2019 que se encuentran en Google Street View®[3]. También ha sufrido en el año 2021 la embestida de un camión que produjo un daño menor sobre el arco.
El último relevamiento del estado del puente, realizado en 2011 por Traversa, indicó que la estructura se encontraba en un estado de deterioro clasificado como Nivel B (NEGRELLI y otros, 2011). Este nivel se asigna debido a la presencia de manchas de óxido y fisuras con un espesor inferior a 0,4 mm, según la catalogación del *Comité Euro-International du Béton*. Un relevamiento anterior (LIMA, 2006) ya señalaba la presencia de este estado de deterioro, detallando que la armadura del intradós mostraba una corrosión generalizada, aunque no se había detectado una reducción significativa en la sección de las barras estructurales que pudiera afectar la estabilidad del puente. Además, este estudio concluyó que la resistencia del material utilizado considerando los estándares de seguridad actuales para la construcción de puentes y su sobrecarga de funcionamiento es suficiente para asegurar su integridad estructural.
Como se ha señalado, en Lima (2006) y en Observatorio de Patrimonio y Paisaje (2016), este puente tiene valor cultural, transformándose en la herencia de generaciones pasadas a generaciones futuras siendo una pieza única actualmente en uso; valor histórico, porque indica el desarrollo de un país en un contexto económico y político; valor económico, porque ha permitido darle beneficio a la zona donde se circunscribe conectando arterias importantes de la ciudad. Además de poseer valor arquitectónico, ambiental y de identidad.

3 Materiales y métodos

Para llevar a cabo este trabajo se ha utilizado una cámara digital Sony® DSC-H2 de 6 megapíxeles y un trípode.
En cuanto a los equipos informáticos necesarios para los trabajos de laboratorio, se empleó una computadora con procesador Intel® Core i3 y 2 GB de RAM. Posteriormente se retoma el

[3] Ubicación -34.892573, -58.006954

trabajo en el año 2015, realizando el procesamiento en una máquina virtual Microsoft Azure® de alto rendimiento (Serie NV6) con 6 núcleos E5-2690v3 en la nube, y finalmente, en el año 2023, en una computadora con procesador Intel® Core i5 y 16 GB de RAM.
Para el procesamiento fotogramétrico y la obtención de ortofotos, se utilizó Agisoft Metashape®. En cuanto al modelado 3D y la extracción de información del modelo de malla fotogramétrica, se empleó el software Autodesk Inventor® 2020. En la Figura 3 se muestra el flujo de trabajo para el presente proyecto.

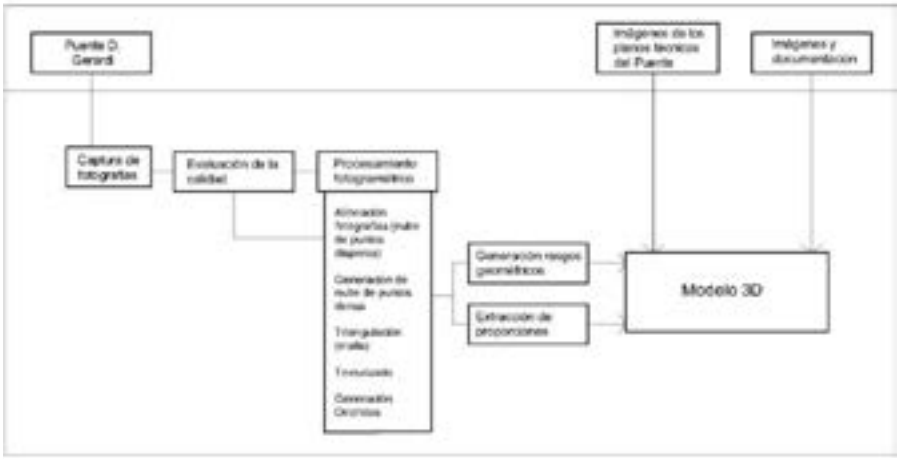


Figura 3 – Flujo de trabajo para el relevamiento y modelado del Puente.
Fuente: de los autores

Para la extracción de algunas dimensiones, se analizó el libro de obra mencionado anteriormente, que relata la construcción del puente, los materiales y costos involucrados, así como las pruebas de deformación del arco del puente. Este libro cuenta con 58 láminas que incluyen imágenes de los planos de la obra. Para este trabajo se consultaron las siguientes láminas:

- Elevación y longitudinal del puente
- Planta y corte transversal del puente
- Corte longitudinal y transversal de la bóveda
- Media planta del semiarco

El trabajo se ha organizado en dos partes: una de campo, donde se realizaron las capturas de fotografías, y otra de laboratorio, donde se llevó a cabo el procesamiento fotogramétrico y la generación del modelo 3D.
Se realizaron un total de 94 capturas fotográficas con una resolución de 2816 x 1120 píxeles. Durante una primera inspección visual, se identificó la presencia de personas en la escena, estas fotografías fueron excluidas del procesamiento fotogramétrico.
En una segunda fase, se estimó la calidad de las fotografías considerando su nitidez con el software Agisoft Metashape®. Los valores obtenidos revelaron un índice, en la parte más enfocada de la imagen, superior a 0.7, con excepción de una imagen que arrojaba un valor de 0.5. Por lo tanto, se decidió descartar esta imagen siguiendo la recomendación del propietario del software (AGISOFT, 2023).
Con base en estas consideraciones, se eliminaron un total de 6 fotografías, y el proceso de análisis y modelado se inicia con las restantes 88 fotografías.

3.1 Desarrollo del procesamiento fotogramétrico

El proceso comienza con la importación de las fotografías en el software de fotogrametría Agisoft Metashape®, y se realiza el procesamiento teniendo en cuenta los siguientes parámetros expresado en la tabla 1.

Proceso	**Resultados / tiempo procesamiento**	**Parámetros**
Nube de puntos dispersa	35.000 puntos / ≈ 2 min	*High, Generic preselection, Reference, Adaptive camera, Guided image matching. 1000 key point limit, 4000 tie point limit.*
Nube de puntos densa	≈ 864.000 puntos / ≈ 22 min	*High, Mild, Calculated point color, Calculated point confidence.*
Malla	≈1.930.000 *faces* / ≈ 6 min	*Dense cloud, High, Arbitrary, Interpolation enable.*
Texturizado	8000 texture size / ≈ 3 min	*Diffuse map*, *Generic, Mosaic, Ghosting filter, Hole filling*.

Tabla 1 - Tabla que resume los parámetros. Fuente: de los autores.

3.2 Modelado 3D

Para llevar a cabo el modelado 3D, se extrajo información geométrica, las proporciones y los ángulos del modelo de malla fotogramétrico. Esta información se obtuvo mediante la intervención del modelo de malla con líneas y planos, tanto sea dibujando sobre el modelo de malla o intersectando con planos que, al seccionar el modelo, generan contornos, como se observa en la Figura 4.

Además, fueron consideradas las medidas que estaban presente en las imágenes de los planos técnicos como así también los ejes constructivos allí planteados. Para poder iniciar el modelado ha sido necesario plantear una referencia. Para ello se han analizado las diferentes distancias de profundidad de los planos verticales del puente y se ha considerado como plano cero el plano vertical, visto de frente, apoyado sobre el arco principal.

En el software de modelado, Autodesk Inventor ®, se ha creado parte por parte el puente en un único modelo iniciando la tarea por los volúmenes centrales, como el arco, el tablero, las columnas y las zonas que conectan un lado del puente con el otro. Posteriormente, se llevaron a cabo los detalles, como las barandas, los apliques, etc., en un lateral para luego replicarlo con simetría central en el otro lado. Este enfoque se adoptó debido a que, al tratarse de un puente oblicuo, no fue posible utilizar la simetría axial ni la copia.

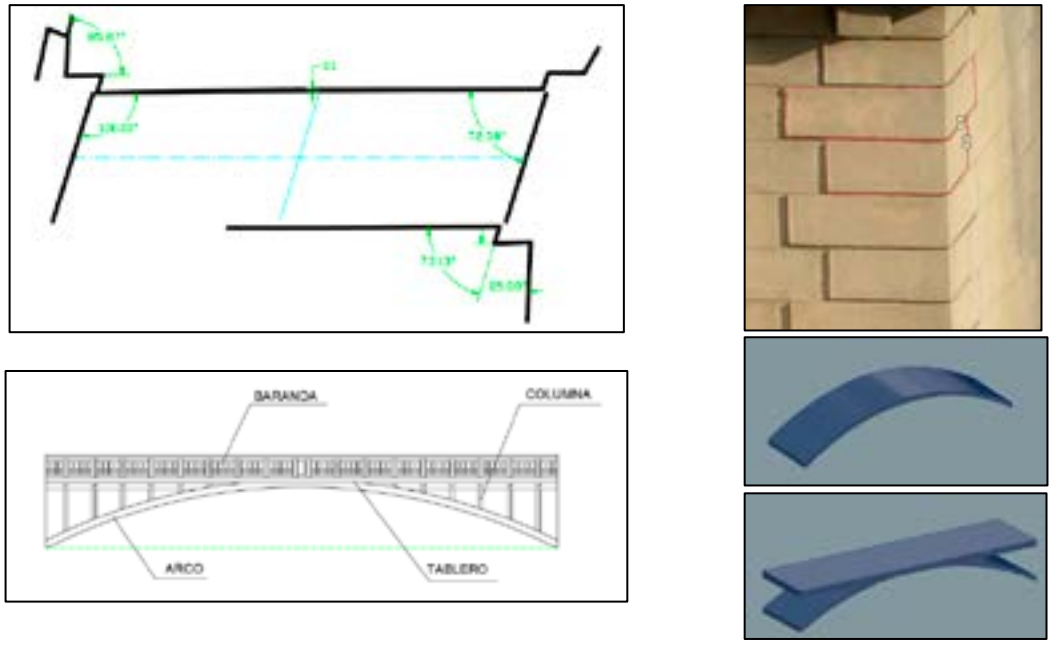


Figura 4 - Proceso de modelado 3D. Fuente: de los autores

En los pasos sucesivos, se construyeron otros detalles como la abertura para la dilatación del puente y los soportes o apoyos.

4 Resultados

Se ha obtenido un modelo digital tridimensional de la obra. Las dimensiones fueron extraídas de las imágenes de los planos técnicos, aunque se encontraron dificultades en la lectura de estos datos debido a la baja resolución de las imágenes. Además, los planos son de carácter constructivo, y varias de las dimensiones necesarias para el modelado no estaban presentes. Cabe mencionar que los ángulos extraídos del modelo de malla, si bien no podemos hablar de precisión dimensional, están muy cercanos a los valores estipulados en el plano técnico. El ángulo principal que le otorga la condición de oblicuidad de 72° 08´ fue de 72º 38´.

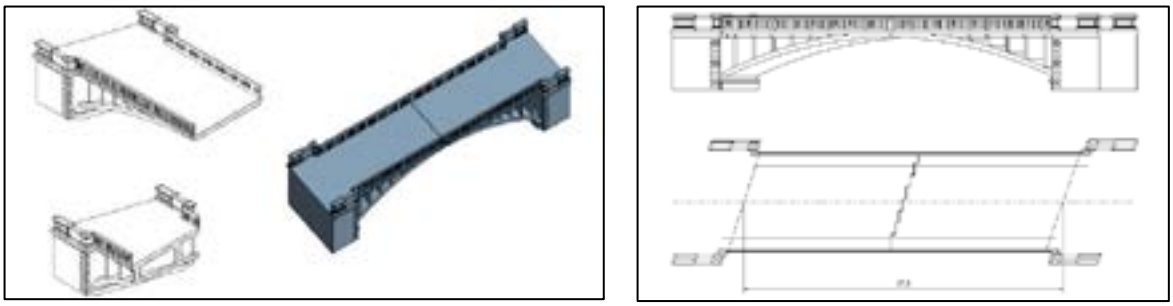


Figura 5 – Modelo 3D del Puente. Fuente: de los autores

Es importante señalar que, disponer del modelo fotogramétrico mientras se realiza el modelado, ha permitido analizar y explorar de una manera dinámica las posibilidades constructivas del mismo y así determinar la lógica que se ha utilizado en el procedimiento de modelado tridimensional en el laboratorio. Los muros de contención no fueron modelados en esta instancia debido a la necesidad de recopilar información geométrica adicional para poder llevarlo a cabo.

5 Conclusiones

En esta primera aproximación al estudio de este bien patrimonial se ha logrado emplear una técnica fotogramétrica de bajo costo en conjunto con otras herramientas para la construcción del modelo 3D. Se espera que en futuras acciones se continúe la búsqueda de información y de los planos originales para generar documentación digital que contribuya a generar un modelo 3D más exacto, que permita ser utilizado en el estudio integral y multidisciplinario de esta obra. Queda demostrado aquí que estos procedimientos, como la fotogrametría en conjunto con otras herramientas tecnológicas, pueden utilizarse con éxito para la generación de documentación, en este caso, el modelo digital 3D, del patrimonio cultural.

En cuanto a conclusiones más específicas de los procedimientos llevados a cabo, se puede señalar la necesidad de una segunda toma fotográfica del puente y relevamientos periódicos sistemáticos, dado que se encuentra en uso y en constante cambio, al igual que su contexto y paisaje circundante.

El modelo 3D generado refleja la intención proyectual original, no el estado actual del puente. Para lograr esto, sería necesario realizar un relevamiento fotogramétrico más complejo, lo que implicaría más tiempo, recursos y equipos específicos para esos fines. Esto permitiría obtener un modelo digital que refleje el estado actual de este bien patrimonial y pueda utilizarse como testimonio del paso del tiempo en una obra que aún cumple su función. Para este nuevo relevamiento, es crucial tener en cuenta que uno de los lados del puente carece de iluminación natural adecuada debido a su orientación. Esto significa que requerirá más tiempo para realizar cada captura fotográfica en ese lado específico. Sería una solución adecuada la implementación de iluminación artificial, pero podría resultar en costos significativos. Una posible mejora en este relevamiento podría ser el uso de otras herramientas tecnológicas, como drones o sistemas de láser escáner, no solo por la precisión que ofrecen, sino también para acceder a los intersticios del puente y poder realizar el relevamiento de la obra completa.

El modelo 3D obtenido permite realizar diversas acciones que favorecen la difusión, de carácter patrimonial, de obras de esta naturaleza. Es posible explorar el patrimonio cultural de una forma inmersiva y realista, con el uso de realidad aumentada y virtual, y ya en el mundo físico, posibilita la creación de réplicas mediante técnicas de fabricación digital (impresión 3D) que pueden ser utilizadas para su estudio o para ser presentadas en espacios de difusión como museos o instituciones educativas. Aún queda por abordar la realización de un modelo 3D con criterios constructivos, lo que no solo permitiría una mejor comprensión de las técnicas y materiales originales, sino que también abriría nuevas posibilidades para su análisis, conservación y restauración.

Agradecimientos
Un agradecimiento especial a los Arq. Marcela Nacarate, Arq. Martin Marigo y Arq. Enrique Ferrari.
A la Jefe de Hemeroteca, Bibl. Cecilia Acuña y personal del Sistema de Información Integrado (SII), Biblioteca "JULIO R. CASTIÑEIRAS" de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.
A la D.I. Marianela Lara.
Al Prof. Dr. Ing. Salvatore Barba de la Universidad de Salerno (UNISA), Italia.

Referencias

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.0. Copyright © 2023 Agisoft LLC. Disponible en: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_ en.pdf Acceso en: 19 de nov. 2023.

ANTINOZZI, S.; RONCHI, D.; BARBA, S. Macro and micro photogrammetry for the virtualization of the Orphic Foil (V-IV B.C.) of National Museum of Vibo Valentia [Macro e micro fotogrammetria per la virtualizzazione della Laminetta Orfica (V-IV a.C.) del Museo Nazionale di Vibo Valentia]. 10.3280/oa-548.86. 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344330380_Macro_and_micro_photogrammetry_for_the_virtualization_of_the_Orphic_Foil_V-IV_BC_of_National_Museum_of_ Vibo _Valentia_Macro_e_micro_fotogrammetria_per_la_virtualizzazione_della_Laminetta_Orfica_V-IV_aC. Acceso en: 19 de nov. 2023.

BARBA, S.; FIORILLO, F. Restitución de datos láser escáner para el análisis de deterioro de bóvedas de ladrillo. X Congreso Internacional Expresión Gráfica aplicada a la Edificación Graphic Expression applied to Building International Conference APEGA 2010. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication /293483872_Restitucion_de_datos_laser_escaner_para_el_analisis_del_deterioro_de_bovedas_de_ladrillo. Acceso en: 19 de nov. 2023.

Concejo Deliberante de la ciudad de La Plata. Decreto Nº25. Expte. 61873. 2018. Disponible en: https://www.concejodeliberante.laplata.gob.ar/decretosconcejo/2018 /dec25_18.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.

CHAVEN CARRA, L.; BARBA, S.; SÁNCHEZ RIVERA, J. I. Primer levantamiento del puente de Maderuelo: actuaciones de emergencia para documentar un puente de presencia intermitente. Biblioteca: estudio e investigación, ISSN 1132-225X, Nº. 34, Págs. 147-172. 2019. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo? codigo=7632180 Acceso en: 19 de nov. 2023.

DEFRANCO, G.; FUERTES, L.; LOPRESTI, L.; GAVINO, S.; LARA, M. Análisis dimensional de modelos obtenidos por fotogrametría de piezas mecánicas. A Revista Brasileira de Expressão Gráfica – RBEG é editada pela Associação Brasileira de Expressão Gráfica – ABEG.Vol. 5, No. 2, 2017. ISSN 2318-7492. 2017. Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103737. Acceso en: 19 de nov. 2023.

FIORILLO, F.; REMONDINO, F.; BARBA, S.; SANTORIELLO, A. DE VITA, C. B.; CASELLATO, A. 3D digitization and mapping heritage monuments and comparison with historical drawings. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W1, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France. 2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/274676682_3D_digitization _and_mapping_of_heritage_monuments_and_comparison_with_historical_drawings. Acceso en: 19 de nov. 2023.

FUERTES, L.; LOPRESTI, L. A.; SPERONI, L.; GAVINO, S.; DEFRANCO, G. Fotogrametría rápida con un dispositivo móvil. Aplicación experimental sobre el motor portátil (locomóvil) de Isla Negra. Actas del Congreso Argentino y Latinoamericano de Ingeniería 2021: CADI CLADI CAEDI 2021. 5° Congreso Argentino de Ingeniería (CADI). 11° Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería (CAEDI). 3° Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI). Facultad de Ingeniería - UBA. ISBN 978-987-88-1872-6. 2021. Disponible en: https://confedi.org.ar/publicaciones/cadi/ Libro_CADI_TOMO1_22-11-18.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.

GERARDI, D. Memoria “Camino Afirmado De la Plata A Avellaneda. Puente En Arco Oblicuo De Cemento Armado Sobre Las Vías Del F. C. Sud (Ramal De Ringuelet A Ferrari)”. Taller De Impresiones Oficiales. 1916.
GONNETDIGITAL. Gonnet: Un camión chocó con el arco del Puente Donato Gerardi. 2021. Disponible en: https://fmgonnet.blogspot.com/search?q=puente +donato+gerardi. Acceso en: 19 de nov. 2023.
LEON LESCANO, N.; BARNET, Y.; RACCHUMI SANTILLAN, A. Captura de datos 3D para virtualizar el patrimonio cultural. ISSN (impreso): 1812-6049; ISSN (en línea): 2523-1820. 2020. Disponible en: https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista30/ articulo7.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.
LIMA, L. Puente “Donato Gerardi”: Un puente patrimonial de hormigón armado en servicio durante 90 años. 2006. Disponible en: https://digital.cic.gba.gob.ar/ collections/e613fa1c-5ab4-4bf6-a039-73f47a14841d. Acceso en: 19 de nov. 2023.
MICHELETTI, N.; CHANDLER, J.; LANE, S. Structure from Motion (SFM) Photogrammetry. Loughborough University. Journal contribution. Disponible en: https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/Structure_from_motion_SFM_photogrammetry/9457355. 2015.
Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad (Provincia). Falleció el ingeniero Donato Gerardi: Ex director de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires. Revista Vialidad. Editado por: Dirección de Vialidad. Sección de Biblioteca y Publicaciones. La Plata. 1962 (Nº20). p. 49. R.N.P.I. no. 586.585. 1962. Disponible en: http://www.vialidad.gba.gov.ar/documentos/archivs/70Publicaciones%20y%20Biblioteca/200806230956340.Revista%20Vialidad%20N%C2%BA%2020.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.
MOON D.; KWON S. W.; CHUNG, S., LEE, S. Y.; KO, T. K. Pre-processing methodology of image compensation using histogram equalization for generating point-cloud of construction environment. Proceedings of the 34rd ISARC, Taipei, Taiwan. Págs 486-492. https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0067. 2017.
MORENA, S.; MOLERO ALONSO, B.; BARRERA-VERA, J. A.; BARBA, S. As-built graphic documentation of the Monumento a la Tolerancia. Validation of low-cost survey techniques. EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación, (13), 98–114. https://doi.org/10.4995/ege.2020.14766. 2020.
NEGRELLI, O.; NIVIO C. A.; CRAVERO, J. J.; GARRO, J.; PANELLA, S. Proyecto de ley Declarando patrimonio arquitectónico y cultural de la provincia de Buenos Aires al puente de hormigón armado "Donato Gerardi" ubicado en el camino general Belgrano, localidad de Gonnet, partido de La Plata. 2011. Disponible en: https://intranet.hcdiputados-ba.gov.ar/proyectos/11-12D2918012018-08-1515-34-4.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.
OBSERVATORIO DE PATRIMONIO Y PAISAJE. Colegio de Arquitectos Distrito 1. El patrimonio como estrategia para el desarrollo social y sustentable. Puente Donato Gerardi. Jornadas latinoamericanas, de patrimonio y desarrollo. ICOMOS Argentina. 2016. Disponible en: https://issuu.com/icomosargentina/docs/ponencias_3ras_jornadas_de_patrimon_910f10fa38f19a. Acceso en: 19 de nov. 2023.
SANZ-ABLANEDO, E.; CHANDLER, J.H.; WACKROW, R. Parameterising Internal Camera Geometry with Focusing Distance. The Photogrammetric Record, 27: 210-226. https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2012.00677.x. 2012.
TRAVERSA L. P. Corrosión de armaduras en el hormigón armado: una problemática del patrimonio moderno. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. 2do Congreso Iberoamericano y X Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio, COIBRECOPA, La Plata, 2011. Disponible en: https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/28. Acceso en: 19 de nov. 2023.
ZHAN, K.; FRITSCH, D., WAGNER, J. F. Integration of photogrammetry computed tomography and endoscopy for gyroscope 3D digitization. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-M-1-2021. 28th CIPA Symposium “Great Learning & Digital Emotion”, 28 August–1 September 2021, Beijing, China. 2021. Disponible en: https://d-nb.info/1240388799/34. Acceso en: 19 de nov. 2023.

DISEÑO DE UN QUEMADOR A HIDRÓGENO COMO ALTERNATIVA PARA PLANTA DE DESALINIZACIÓN: ANÁLISIS CFD SOBRE LA COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO

Penillas Juan M.[1*], Gutiérrez Fernando[1]

(1) Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
*e-mail: juanmanuel.penillas@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

El acceso al agua dulce es un desafío crítico en la costa patagónica argentina, donde regiones como el norte de Santa Cruz enfrentan una demanda creciente que supera la capacidad de sus fuentes tradicionales —lago Musters y acuíferos locales—. Esta escasez impacta no solo a los hogares, sino también a sectores productivos que incurren en costos elevados para garantizar operaciones básicas, higiene y mantenimiento. Ante este escenario, la desalinización mediante tecnologías de humidificación/deshumidificación (HDH) surge como una alternativa viable, destacándose por su flexibilidad, bajo mantenimiento, larga vida útil y reducida inversión inicial. Además, su operación a presión atmosférica permite el uso de materiales económicos y de fácil fabricación, mientras que su capacidad para tratar aguas con alta concentración de sales y su compatibilidad con energías renovables amplían su potencial. Un sistema HDH convencional consta de tres componentes esenciales: un calentador de agua, una torre de humidificación y un condensador. No obstante, el uso de calderas alimentadas con combustibles fósiles —como fuel oil o gas natural— contradice uno de los pilares fundamentales de esta tecnología: la sustentabilidad. Aunque alternativas como la energía geotérmica ofrecen ventajas ambientales, su aplicación está restringida por limitaciones geográficas. En este contexto, la planta experimental de hidrógeno en Pico Truncado (Santa Cruz), alimentada por energía eólica, emerge como una solución innovadora. Este proyecto no solo permite la producción de hidrógeno verde (obtenido mediante electrólisis alimentada por energías renovables), sino que abre la puerta a su uso como combustible en calderas HDH, sustituyendo fuentes fósiles y reduciendo emisiones de CO_2, alineándose con iniciativas globales.

La integración de hidrógeno en sistemas HDH promete optimizar la eficiencia energética mediante la inyección de vapor caliente en flujos de aire saturado, mejorando el intercambio térmico y la producción de agua dulce. Sin embargo, su combustión presenta desafíos técnicos significativos, como velocidades de llama elevadas (~3 m/s frente a 0,4 m/s del gas natural) y la necesidad de un control preciso de la relación aire/combustible para evitar inestabilidades. Estos factores exigen diseños de quemadores especializados que garanticen seguridad y rendimiento.

Este trabajo se enfoca en el estudio sobre la combustión de hidrógeno mediante un análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD). El objetivo principal es modelar la combustión de hidrógeno puro, evaluando patrones de flujo y distribución térmica, con el fin de sentar bases técnicas para futuros prototipos experimentales.

MODELADO CFD

El quemador de referencia es un micro-quemador planar de acero inoxidable (SS 316L) estudiado experimentalmente por [Li et. al., 2016], con dimensiones de 1 mm de altura, 21 mm de longitud y 10 mm de ancho. Este trabajo utiliza ANSYS Fluent para replicar numéricamente el perfil axial de temperatura de pared reportado experimentalmente, con el fin de validar la metodología de modelado propuesta.

Metodología de modelado

Debido a la relación de aspecto del micro-quemador (10:1), el flujo se considera predominantemente bidimensional y simétrico respecto al eje central. Por ello, se empleó un dominio axisimétrico bidimensional de 0.5 mm de altura y 21 mm de longitud. Las ecuaciones de conservación resueltas en estado estacionario incluyen: masa, momento (direcciones axial y radial), energía y especies químicas, cuyas formulaciones estándar se adoptaron según las definiciones del manual de ANSYS Fluent [Fluent User´s Manual 2022 R1].

Modelado de Viscosidad

El modelo k-ω SST (Shear Stress Transport), combinado con correcciones Low-Re y el modelo de transición γ-Reθ, se seleccionó para capturar la física multiescala del flujo. Las correcciones Low-Re permiten resolver directamente la subcapa viscosa en las paredes, crítico en micro-geometrías donde los efectos viscosos dominan, mientras que el modelo γ-Reθ predice la transición laminar-turbulenta mediante ecuaciones de transporte para la intermitencia (γ) y el número de Reynolds de espesor de momento (Reθt). Esta combinación es clave para predecir la estabilidad de la llama y las pérdidas por fricción en flujos confinados, al integrar desde capas límite viscosas (transferencia de calor) hasta turbulencia reactiva (mezcla de especies).

Tabla 1. Mecanismo de reacción en fase gaseosa para combustión H_2-aire*

Reacción	A_k (m, kmol, s)	β_k	E_k , J/kmol
1. O_2+ H = OH + O	5.1e+13	-0.82	6.91e+07
2. H_2+ O = OH + H	1.8e+07	1.00	3.70e+07
3. H_2+ OH = H_2O + H	1.2e+06	1.30	1.52e+07
4. OH + OH = H_2O +O	6.0e+05	1.30	0.00
5. H_2+O_2= OH + OH	1.7e+10	0.00	2.0e+08
6. H + OH + M =H_2O + M†	7.5e+17	-2.60	0.00
7. O_2+ M =O + O + M	1.9e+07	0.50	4.00e+08
8. H_2+ M =H + H + M‡	2.2e+09	0.50	3.88e+08
9. H + O_2+ M = HO_2+ M§	2.1e+12	-1.00	0.00
10. H + O_2+ O_2= HO_2+ O_2	6.7e+13	-1.42	0.00
11. H + O_2+ N_2= HO_2+ N_2	6.7e+13	-1.42	0.00
12. HO_2+ H = H_2 + O_2	2.5e+10	0.00	2.90e+06
13. HO_2+ H = OH + OH	2.5e+11	0.00	7.90e+06
14. HO_2+ O = OH + O_2	4.8e+10	0.00	4.20e+06
15. HO_2+ OH = H_2O + O_2	5.0e+10	0.00	4.20e+06
16. HO_2+ HO_2 = H_2O_2 + O_2	2.0e+9	0.00	0.00
17. H_2O_2+ M = OH +OH +M	1.3e+14	0.00	1.91e+08
18. H_2O_2+ H = H_2+ HO_2	1.7e+09	0.00	1.57e+07
19. H_2O_2+ OH = H_2O + HO_2	1.0e+10	0.00	7.50e+06

∗Las constantes de velocidad se dan en la forma $k = A_k T^{\beta_k} \exp(-E_k/RT)$

†Factores de mejora: $H_2O = 20.0$

‡ Factores de mejora: $H_2O = 6.0$, $H = 2.0$, $H_2 = 3.0$

§ Factores de mejora: $H_2O = 21.0$, $H_2 = 3.3$, $O_2 = 0.0$, $N_2 = 0.0$

Modelado de Especies

Se implementó el esquema EDC (Eddy Dissipation Concept) + PSR (Perfectly Stirred Reactor) + Dynamic Cmix para modelar la combustión turbulenta de hidrógeno. El EDC acopla la escala de tiempo de mezcla turbulenta (τ_{mix}) con la cinética química ($\tau_{chem} \approx 10^{-5}$s para H_2), mientras que el PSR resuelve la química detallada en "estructuras finas" de alta disipación, incluyendo fenómenos como extinción/reignición. El Dynamic Cmix ajusta automáticamente la constante de mezcla (C_{mix}) en función de gradientes locales de velocidad y temperatura, optimizando la predicción de la velocidad de reacción en flujos transicionales. Esta configuración es ideal para hidrógeno/aire, ya que integra efectos térmicos (velocidad de llama $\sim 300\,cm/s$) y químicos, manteniendo viabilidad computacional en 2D axisimétrico particularmente con mallas refinadas ($y^+ < 1$).

Mecanismo de Reacción

La combustión de H_2/aire se modeló mediante un mecanismo reducido de 9 especies (H_2, O_2, H_2O, H, O, OH, HO_2, H_2O_2, N_2) y 19 reacciones elementales (Tabla 1), validado para condiciones de microescala (300–1500 K, ~1 atm) [Giovangigli, 1987]. Este esquema incluye vías críticas como la formación de radicales (H, O, OH), la oxidación de HO_2/H_2O_2 (relevante en bajas temperaturas) y la producción de H_2O, capturando fenómenos esenciales como ignición, velocidad de llama y extinción. Aunque simplificado frente a mecanismos detallados (>50 especies), su eficiencia computacional permite acoplarlo a modelos de turbulencia (EDC+PSR) sin sacrificar precisión en geometrías restrictivas.

Independencia del mallado

Se realizó un estudio de independencia del mallado utilizando celdas estructuradas cuadradas para maximizar la calidad numérica, con un barrido logarítmico no uniforme ($\Delta x = 0.01, 0.02, 0.05, 0.1$ mm) fundamentado en las escalas físicas críticas del flujo reactivo y los requisitos del modelo desarrollado. El tamaño mínimo (Δx = 0.01 mm) asegura resolver el espesor de llama laminar ($\delta_L \sim 0.1$mm) con $\delta_L/10$ y capturar la escala de Kolmogorov ($\eta \approx 0.01 - 0.05$mm), cumpliendo $y^+ < 1$ en las paredes del microcanal, esencial para modelos de baja Re que requieren precisión en capas límite delgadas. La progresión geométrica prioriza regiones donde el error numérico exhibe no linealidad, como cerca de la zona de reacción y en estructuras vorticiales sub-Kolmogorov, vinculándose a la transición donde el modelo EDC promedia fluctuaciones químicas en "estructuras finas".

En la Figura 1 se muestra los resultados obtenidos en el estudio sobre el orden del error basados en la fracción de hidrógeno no quemado obtenida en la salida, mientras que la Figura 2 muestra el vínculo entre la misma fracción respecto al número de elementos del mallado.

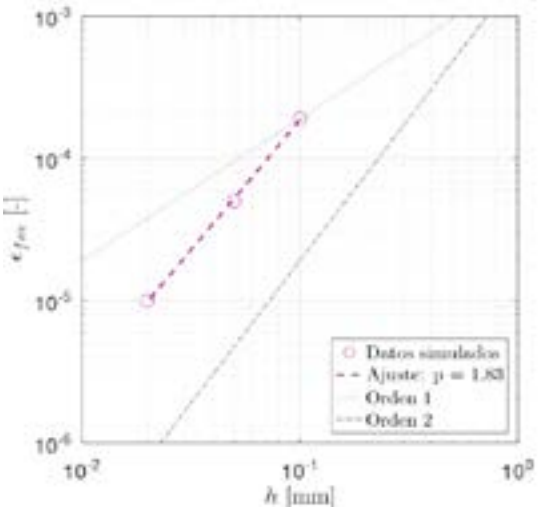


Figura 1. Orden del error

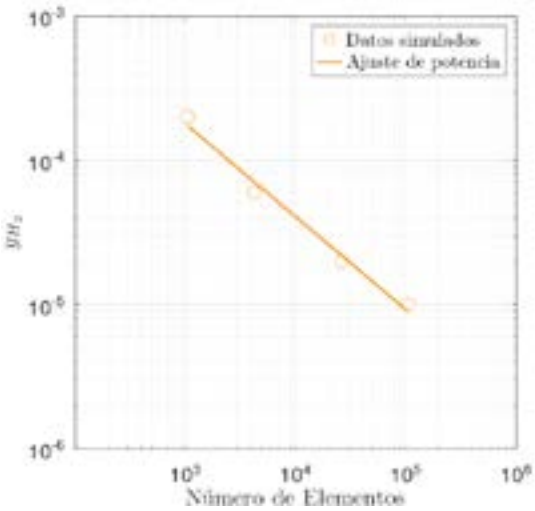


Figura 2. Independencia del mallado

Observando la Fig.1 se puede notar que el orden de convergencia del error $p = 1.83$, el cual resulta próximo al orden teórico del esquema numérico utilizado ($p = 2$). La discrepancia entre el orden de convergencia del error observado y el teórico puede atribuirse a efectos no ideales inherentes a la simulación de flujos reactivos turbulentos.

A pesar de la ligera desviación, todos los errores se mantuvieron por debajo de 10^{-3} (Fig.1), validando la confiablidad de todos los mallados. Sin embargo, la elección de $\Delta x = 0.02$ mm como resolución óptima se fundamenta en un análisis costo-beneficio.

En esencia, $p = 1.83$ refleja un equilibrio entre la teoría numérica y las complejidades multifísicas del problema. La elección de $\Delta x = 0.02$ mm no solo respeta este equilibrio, sino que también alinea la resolución numérica con los límites físicos de los modelos empleados, evitando sobreinversión en escalas donde las ganancias de precisión son marginales frente a costos exponenciales.

Validación

La validación del modelo se realizó comparando las temperaturas de pared simuladas con los datos experimentales reportados por [Li et al., 2016] para un microquemador operando con dosado ϕ=0.8. Se analizaron dos velocidades de entrada: 2 m/s (Figura 3a) y 3 m/s (Figura 3b), abarcando 19 puntos axiales a lo largo del quemador.

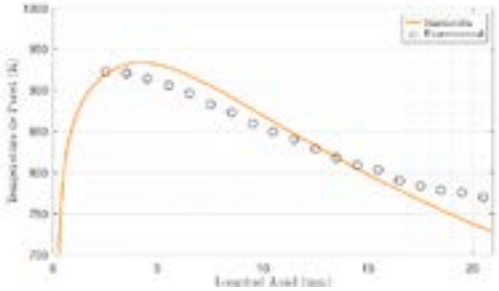


Figura 3. Validación $\phi = 0.8$ y $2\,\mathrm{m/s}$

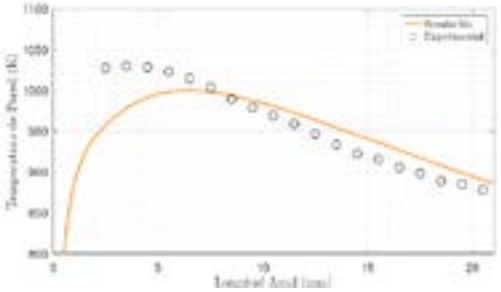


Figura 4. Validación $\phi = 0.8$ y $3\,\mathrm{m/s}$

En ambos casos, las simulaciones replicaron las tendencias experimentales con precisión cuantificable:

Caso a 2 m/s: Error relativo promedio del 1.9%, con una desviación máxima del 4.84% cerca de la salida del quemador, región asociada a la estabilización completa de la flama y gradientes térmicos suaves.

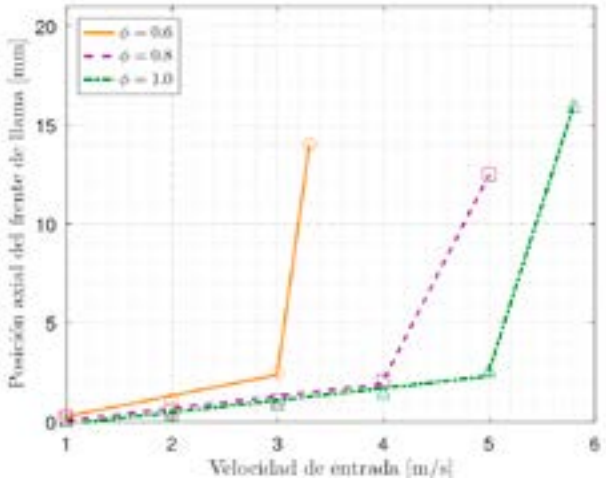
Caso a 3 m/s: Error relativo promedio ligeramente mayor (2.22%), con una desviación máxima del 6.82% en la zona de ignición (primer tercio axial), donde la interacción turbulencia-química es más intensa y sensible a discretizaciones gruesas.

La concordancia global valida la capacidad del modelo desarrollado para predecir perfiles térmicos en regímenes de combustión confinada. La consistencia global respalda la precisión del mallado seleccionado, cuyos resultados de independencia (Figs.1 y 2) aseguran que los errores no están dominados por la discretización espacial.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Soplado de llama

El análisis del fenómeno de blow-off (extinción por soplado) en combustión de hidrógeno-aire es fundamental para avanzar en el desarrollo de sistemas de combustión limpios y eficientes. Estudiar el blow-off no solo permite optimizar el diseño para evitar fallos operativos, sino que también contribuye a maximizar la eficiencia energética y reducir emisiones, aspectos esenciales en tecnologías sostenibles. Esta sección explora las motivaciones técnicas que justifican profundizar en este fenómeno, destacando su impacto en la viabilidad de sistemas innovadores basados en hidrógeno. La Figura 5 ilustra la relación entre la velocidad de entrada y la posición axial del frente de llama para diferentes relaciones de dosado.



La estabilización de frentes de llama en combustores confinados está determinada por el equilibrio entre el tiempo químico de la reacción (τ_{chem}) y el tiempo aerodinámico de residencia

(τ_{flow}), cuantificado mediante el número de Damköhler ($Da = \tau_{flow}/\tau_{chem}$). En regímenes de baja a moderada velocidad de entrada (Fig. 5), el frente de llama se desplaza linealmente hacia aguas abajo con el incremento de velocidad ($\Delta x \propto \Delta u$). Este comportamiento se explica por el ajuste dinámico del sistema para mantener $Da > 1$, asegurando que el tiempo de residencia sea suficiente para completar las reacciones exotérmicas.
El equilibrio se favorece por la zona de precalentamiento en la entrada, donde el desarrollo de la capa límite reduce localmente la velocidad del flujo, actuando como mecanismo de anclaje fluidodinámico.
Al aproximarse a la velocidad crítica (u_{crit}), el sistema sufre una transición abrupta: pequeños incrementos en u provocan variaciones exponenciales en la posición de la llama (evidenciado por el último punto de cada serie paramétrica en la Fig. 5). Esta sensibilidad extrema marca el límite de estabilidad, donde el frente de llama pierde su anclaje hidrodinámico. Finalmente, se produce el fenómeno de soplado de la llama (blow-off), expulsando el frente del dominio de combustión.

Influencia de la radiación

El análisis del papel de la radiación en sistemas de combustión de hidrógeno-aire, es clave para mejorar la precisión de modelos predictivos y optimizar procesos energéticos. A diferencia de los combustibles convencionales, el hidrógeno presenta propiedades radiantes distintivas que alteran la transferencia de calor y la dinámica de la llama, lo cual puede afectar tanto la estabilidad del proceso como la distribución térmica. Comprender la interacción entre la radiación y las reacciones químicas no solo permite ajustar parámetros operativos para evitar ineficiencias, sino que también ayuda a mitigar riesgos asociados a la degradación de materiales y a controlar especies contaminantes secundarias.
En el modelado CFD del micro-quemador de hidrógeno/aire, la radiación se calculó mediante el modelo P1 y el enfoque MGGW-Domain-Based (*Modified Gray Gas Weighted*, basado en propiedades promedio del dominio). El modelo P1, al aproximar la ecuación de transferencia radiante (RTE) como una ecuación de difusión, permitió estimar eficientemente el flujo de calor radiante en la geometría. Por su parte, el MGGW-Domain-Based introdujo un tratamiento no-gris simplificado, asignando coeficientes de absorción efectivos (κ_{eff}) a bandas espectrales clave del vapor de agua (H_2O), principal especie radiante en la combustión de hidrógeno. Aunque este enfoque promedia las propiedades radiantes en todo el dominio, ofrece un equilibrio razonable entre precisión y coste computacional para microescalas, donde la generación de H_2O está directamente vinculada al dosado (ϕ) y a la temperatura local. Sin embargo, al suavizar gradientes locales de H_2O, podría subestimar pérdidas radiantes en regiones cercanas al núcleo de la llama.
La Fracción de Pérdida de Calor por Radiación (RHLF) es un parámetro clave que cuantifica la eficiencia con la que la energía química del combustible se disipa como radiación térmica. Se calcula como el cociente entre la potencia radiada neta ($\dot{Q}_{rad}$) y la energía química liberada por el hidrógeno ($\dot{m}_{h_2}$, PCI), expresado en porcentaje. Teóricamente, el RHLF debería alcanzar su máximo en condiciones estequiométricas ($\Phi = 1.0$), donde la producción de vapor de agua, principal especie radiante, es máxima. Sin embargo, en este estudio, al fijar la velocidad de entrada ($u_{inlet} = 3\,m/s$) y variar el dosado (Φ), se observó un corrimiento del RHLF máximo hacia $\Phi = 0.8$ (11.42%), con valores menores en $\Phi = 1.0$ (9.10%) y $\Phi = 0.6$ (9.29%).
Este comportamiento puede explicarse por la interacción entre las condiciones de frontera y las limitaciones del modelo numérico. Al fijar la velocidad, el flujo másico total ($\dot{m}_{mezcla}$) varía con Φ, ya que la densidad de la mezcla disminuye al aumentar la proporción de hidrógeno (menos denso que el aire). En $\Phi = 0.8$, aunque la concentración de H_2O es inferior a la estequiométrica, el mayor flujo másico de aire podría compensar parcialmente la energía térmica disponible, elevando la temperatura local y, con ello, la emisión radiante. Adicionalmente, el modelo de radiación MGGW-Domain-Based, al promediar propiedades en todo el dominio, subestima los gradientes locales de H_2O en $\Phi = 1.0$, donde su concentración

es crítica. Esta aproximación, combinada con una cinética química simplificada, genera un desacople entre la química y la radiación, distorsionando la tendencia esperada.

Producción de NO_x

El análisis de los mecanismos de formación y mitigación de óxidos de nitrógeno (NOx) en sistemas de combustión de hidrógeno-aire es esencial para consolidar su rol como tecnología sostenible en la transición energética. Aunque el hidrógeno se destaca por su combustión libre de CO_2, las altas temperaturas de llama y las interacciones químicas en ambientes oxidantes favorecen la generación de NOx, contaminantes críticos asociados a impactos ambientales y en la salud humana. Estudiar la dinámica de formación de NOx no solo permite desarrollar estrategias operativas —como la modulación de la relación aire-combustible o el enfriamiento selectivo— para suprimir su generación, sino que también contribuye a optimizar la eficiencia global y la durabilidad de los materiales.

En este estudio, se implementó el modelo de NOx térmico disponible en ANSYS Fluent y se comparó su desempeño con el modelo radiante. Los resultados mostraron que la reducción del dosado disminuye la formación de NOx, en concordancia con lo esperado. Para un dosado unitario, la fracción másica de NO fue de 1.92×10^{-6}; al reducir el dosado a 0.8, descendió a 1.78×10^{-6} y, finalmente, con un dosado de 0.6, alcanzó un valor de 1.05×10^{-6}.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología computacional de dinámica de fluidos (CFD) para modelar la combustión de mezclas de hidrógeno-aire, integrando un mecanismo de reacción detallado con 9 especies químicas y 19 pasos elementales. La validación del modelo, realizada mediante comparación con datos experimentales en velocidades de flujo de 2 y 3 m/s (con dosado de 0.8), demostró una excelente concordancia, presentando errores promedio de 3% y 1.4%, respectivamente. Esto confirma la capacidad del modelo para reproducir escenarios realistas bajo condiciones controladas.

Mediante un análisis paramétrico, se caracterizó el fenómeno de blow-off para dosados de 1, 0.8 y 0.6. Los resultados fueron coherentes con la teoría, observándose una progresión lineal de la velocidad de la llama hasta el punto crítico de extinción, marcado por un salto discontinuo en la estabilidad de la combustión.

En cuanto al estudio de radiación, aunque se aplicaron metodologías inicialmente consideradas adecuadas, no se logró replicar la tendencia teórica del (RHLF) en función del dosado. Si bien se obtuvo una curva simétrica, esta presentó un desplazamiento hacia el dosado 0.8, en lugar de centrarse en el dosado estequiométrico (ϕ=1), lo que sugiere posibles limitaciones en los modelos de radiación empleados o en la interacción química- radiante.

Finalmente, el análisis de emisiones de NOx mostró una buena correlación con las tendencias teóricas, reforzando la validez del modelo para predecir contaminantes críticos en procesos de combustión.

En conjunto, el trabajo evidencia la robustez del enfoque CFD para estudiar fenómenos complejos de combustión, aunque destaca la necesidad de profundizar en la modelización de efectos radiantes para mejorar la precisión en escenarios no estequiométricos.

REFERENCIAS

[J. Li, Q. Li, Y. Wang, Z. Guo, X. Liu, Fundamental flame characteristics of premixed H2-air combustion in a planar porous micro-combustor, Chem. Eng. J. 283 (2016) 1187–1196.]

[ANSYS Inc. (2022). ANSYS Fluent User's Guide (Versión 2022 R1) [Manual del usuario]. ANSYS Inc.]

[V. Giovangigli and M.D. Smooke, Extinction of strained premixed laminar flames with complex chemistry, Combustion Science and Technology 53,(1987) pp. 23–49.]

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS VARIABLES PRINCIPALES EN UN CICLO DE REFRIGERACIÓN EMPLEANDO UN TUBO VORTEX

Penillas Juan M.[1*], Mariani Néstor J.[2,3]

(1) Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
(2) Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
(3) Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA) CONICET- UNLP - CIC BA
La Plata, Argentina
*e-mail: juanmanuel.penillas@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

El Tubo Vortex de Ranque-Hilsch (VT) es un dispositivo sin partes móviles capaz de separar una corriente de un fluido comprimido en dos corrientes a menor presión, pero con diferentes temperaturas: una más alta y otra más baja respecto a la entrada. La Figura 1 presenta una representación esquemática de un VT ofrecido comercialmente [1]. En la actualidad, los VT se utilizan para refrigerar componentes como: controles electrónicos, piezas soldadas, sistemas de mecanizado y cámaras de vigilancia (CCTV).

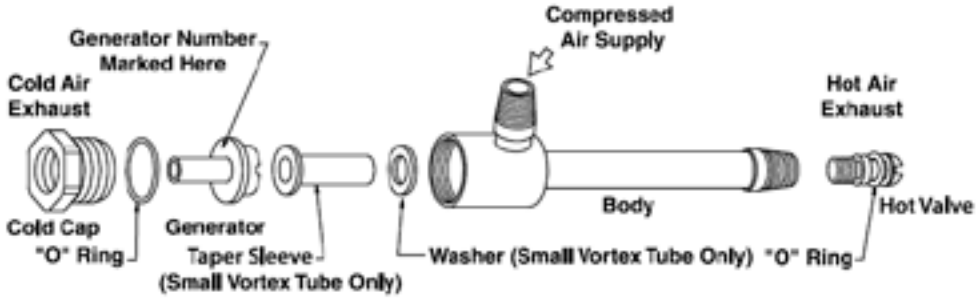


Figura 1. Despiece en perspectiva explotada del Tubo Vortex Exair®

Aunque el dispositivo presenta una eficiencia exergética relativamente baja —dado que no aprovecha la exergía de la expansión del aire para producir trabajo útil—, ofrece ventajas únicas frente a otros sistemas de refrigeración. La principal es su capacidad para alcanzar bajas temperaturas de forma instantánea y regulable, empleando gases, como típicamente, el aire. Además, al no contar con partes móviles, no produce vibraciones. Sumado a su diseño compacto y ligero, generalmente en acero inoxidable, resulta baja la inversión y los costos de mantenimiento. Cabe aclarar que la aplicación de este dispositivo no pretende competir con los sistemas de refrigeración convencionales sino proveer una alternativa para refrigeración localizada valiéndose de las ventajas mencionadas anteriormente.

Las particularidades del funcionamiento del VT han captado la atención de investigadores en todo el mundo: unos para profundizar en su fenomenología interna, y otros para explorar alternativas de aplicación. Recientemente, se ha publicado un artículo [2] que clasifica los estudios según criterios como la separación de energía, fases, tipo de gas y posibles desarrollos futuros. En el mismo se evidencia que los estudios referidos a la configuración termodinámica del ciclo de funcionamiento de los VT son escasos.

Frente a este panorama, este trabajo se orienta a analizar la estructura termodinámica del ciclo de refrigeración utilizando únicamente gases como fluidos de trabajo, un tema con escasas referencias previas [3].

OPERACIÓN DEL TUBO VORTEX

La caracterización del comportamiento térmico del VT —es decir, las temperaturas alcanzadas— se realiza en función de los caudales de salida, particularmente mediante un parámetro conocido como fracción fría, ε_c, definida como la relación entre el caudal de salida frío y el caudal de entrada. Esto se debe a que, para condiciones de suministro fijas, la única variable operativa es la válvula reguladora ubicada en la salida caliente (ver esquema de la Fig. 1). Cabe destacar que, en términos prácticos, este parámetro se encuentra acotado al rango $0.20 \leq \varepsilon_c \leq 0.80$.

Al plantear el balance de masa, energía y entropía para el VT —considerado como un sistema estacionario, adiabático y operando con un gas ideal de propiedades termofísicas constantes—, con una entrada (i) a presión y temperatura fijas, y dos salidas $(h,\ c)$ en condiciones de presión ambiental (p_0), se obtienen las siguientes expresiones para las relaciones de temperaturas de salida de las corrientes fría y caliente,

$$r_p{}^{\Gamma} e^{-\Lambda} = r_c{}^{\varepsilon_c} \cdot \left[\frac{1-\varepsilon_c r_c}{1-\varepsilon_c}\right]^{(1-\varepsilon_c)} \tag{1a}$$

$$r_p{}^{\Gamma} e^{-\Lambda} = r_h{}^{\varepsilon_h} \cdot \left[\frac{1-\varepsilon_h r_h}{1-\varepsilon_h}\right]^{(1-\varepsilon_h)} \tag{1b}$$

En estas ecuaciones, se identifican los siguientes parámetros:

- *Coeficiente de expansión isoentrópica*: $\Gamma = R_g/c_p$.
- *Entropía generada adimensional*: $\Lambda = \dot{S}_{gen}/(\dot{m}_i c_p)$.
- *Relación de expansión*: $r_p = p_i/p_0$.
- *Fracción fría*: $\varepsilon_c = \dot{m}_c/\dot{m}_i$, y su complemento, *fracción caliente*: $\varepsilon_h = 1-\varepsilon_c$.
- *Relación de temperatura*: $r_c = T_c/T_i$ (*fría*) y $r_h = T_h/T_i$ (*caliente*), considerando los valores que corresponden a la condición de estancamiento.

La mayoría de los parámetros en (1a) y (1b) son conocidos: el tipo de gas define Γ; las condiciones de entrada fijan T_i y p_i; y la válvula regula ε_c. Respecto a Λ, al ser consecuencia de la transformación, se encuentra acotada entre un proceso reversible, $\Lambda^{min} = 0$, y uno completamente irreversible, $\Lambda^{max} = \Gamma \cdot \ln(r_p)$. Como consecuencia las temperaturas de salida dependen fuertemente de Λ.

En un trabajo anterior [4], se identificaron tres puntos característicos de funcionamiento mediante un análisis termodinámico combinado con simulaciones fluidodinámicas computacionales (CFD), los cuales fueron validados experimentalmente para un tubo EXAIR® modelo 3225 (708 slpm).

1. *Mínima temperatura fría*: $\varepsilon_c = 0.20$.
2. *Máxima temperatura caliente*: $\varepsilon_c = 0.80$.
3. *Máxima separación de energía (para ambas corrientes)*: $\varepsilon_c \cong 0.60$.

Esto condiciona la operación del dispositivo, ya que el punto de máxima capacidad de refrigeración y mínima temperatura no coinciden.

Como complemento, al plantear el balance de exergía, se obtiene la destrucción de exergía del dispositivo

$$\dot{X}_d = \dot{m}_i c_p \cdot T_i \, \Lambda \tag{2}$$

Introduciendo la Ec. (2) en la definición de eficiencia exergética, surge que

$$\eta_x = 1 - \frac{\Lambda}{\Lambda^{max}} \tag{3}$$

De la Ec. (3) se puede verse que la eficiencia exergética del VT está determinada por la relación entre la entropía generada actual (Λ) y la máxima (Λ^{max}).

Adicionalmente, en [4] se concluyó que el sistema es altamente ineficiente, presentando una relación Λ/Λ^{max} cercana a 1 para todo el rango operativo. Aunque Λ presenta una ligera variación con a ε_c, se determinó que puede tomarse un valor representativo de $\eta_x = 1.5\%$ para aproximar el comportamiento global del dispositivo.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL TUBO VORTEX

La configuración típica para la aplicación de un VT se basa en un Ciclo Abierto (OCVT, por sus siglas en inglés) que comprende, en serie, un compresor, un enfriador que utiliza el ambiente como sumidero de calor, el propio VT y, al final de la salida fría, la aplicación de refrigeración (véase Fig. 2). La refrigeración de la carga térmica puede realizarse mediante contacto directo —más común, donde la corriente fría se descarga directamente sobre la carga— o contacto por indirecto, mediante un intercambiador de calor.
Dado que se trata de un ciclo abierto y, en línea con la disposición de contacto directo, se utiliza aire atmosférico como principal (y prácticamente único) gas de trabajo. Su alta disponibilidad, facilidad de manipulación y nulo potencial contaminante lo hacen ideal para esta aplicación.

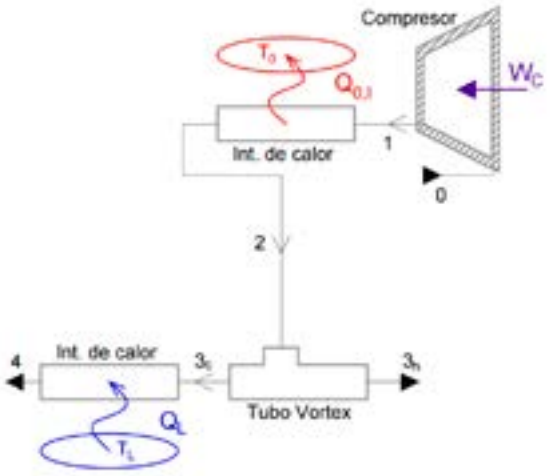


Figura 2. Esquema OCVT

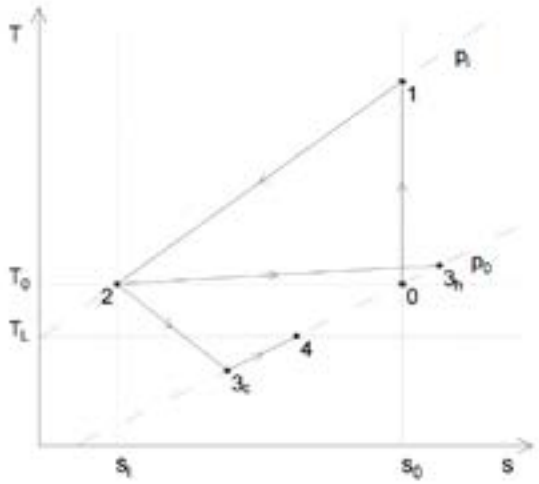


Figura 3. Diagrama T-s OCVT

En la Figura 3 se presentan las transformaciones termodinámicas que experimenta el gas a medida que evoluciona dentro del ciclo en un diagrama T vs s. Los procesos involucrados son: compresión isoentrópica del gas (0→1), rechazo de calor a presión constante hasta alcanzar la temperatura ambiente (1→2), expansión y separación en el VT (2→3c para la corriente fría y 2→3h para la corriente caliente), y, finalmente, absorción del calor de la carga térmica por parte de la corriente fría hasta llegar a la temperatura de la carga (3c→4).
Para este análisis se asume una eficiencia unitaria tanto en la compresión como en los intercambios de calor, lo que permite un desarrollo simple y directo, dejando abierta la posibilidad de incorporar estos parámetros en futuros análisis. No obstante, se incluye un indicador sobre el aprovechamiento energético: el Coeficiente de Performance del Ciclo Abierto del Tubo Vortex ($\mathrm{COP}^{\mathrm{OCVT}}$). Para ello, es necesario precisar el calor absorbido por la carga térmica, la cual se modela como una fuente a temperatura constante, T_L, limitada por la temperatura de la corriente fría, T_{3c}. Dada una T_L, el calor extraído de la carga resulta:

$$Q_L = \varepsilon_c \dot{m}_i c_p (T_L - T_{3c}) \qquad (4)$$

Utilizando la definición del COP y la ecuación (4), se obtiene

$$\mathrm{COP}^{\mathrm{OCVT}} = \frac{Q_L}{|W_C|} = \frac{\varepsilon_c \dot{m}_i c_p (T_L - T_{3c})}{\dot{m}_i c_p T_1 \left|1 - r_p{}^{\Gamma}\right|} = \frac{\varepsilon_c}{r_p{}^{\Gamma} - 1}(r_L - r_c) \quad \text{con } r_p > 1 \qquad (5)$$

La inclusión del VT en el contexto del OCVT involucra dos aspectos de relevancia para su aplicación: la compresión del gas (costo energético), representada por r_p, y la carga térmica (demanda de refrigeración), representada por r_L. En ese sentido, la Ec. (5) permite evaluar el desempeño del OCVT, conforme se modifican estos factores.
En la Fig. 2 puede verse que la corriente 4 (aire frío después de la carga térmica) se libera al ambiente sin aprovechar su capacidad refrigerante residual. Esto representa un desperdicio energético, ya que el gas aún tiene la capacidad de absorber calor ($T_L < T_0$) hasta llegar al equilibrio térmico con el ambiente.

CICLO RECUPERATIVO DE REFRIGERACIÓN CON TUBO VORTEX

Como alternativa a la configuración típica en ciclo abierto, en este trabajo se propone un ciclo cerrado recuperativo (RCCVT, por sus siglas en inglés) que incorpora un recuperador de calor (Fig. 4). Esta configuración redunda, por un lado, en el aprovechamiento del potencial de refrigeración residual y, por otro, abre la posibilidad de emplear gases distintos al aire. En la Figura 5 se esquematizan los procesos termodinámicos del RCCVT, que se desarrollan de la siguiente manera: compresión isoentrópica del gas (0→1), rechazo de calor a presión constante hasta alcanzar la temperatura ambiente (1→2), rechazo de calor a presión constante en el recuperador (2→5), expansión y separación en el VT (5→3c para la corriente fría y 5→3h para la corriente caliente), absorción del calor de la carga térmica por parte de la corriente fría hasta llegar a la temperatura de la carga (3c→4), absorción de calor a presión constante en el recuperador (4→6), rechazo de calor a presión constante de la corriente caliente hasta la temperatura ambiente (3h→7) y, finalmente, mezcla de las corrientes para reiniciar el ciclo (6+7→0).

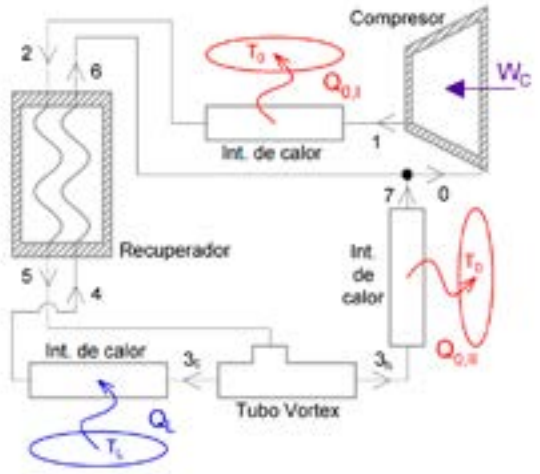


Figura 4. Esquema RCCVT

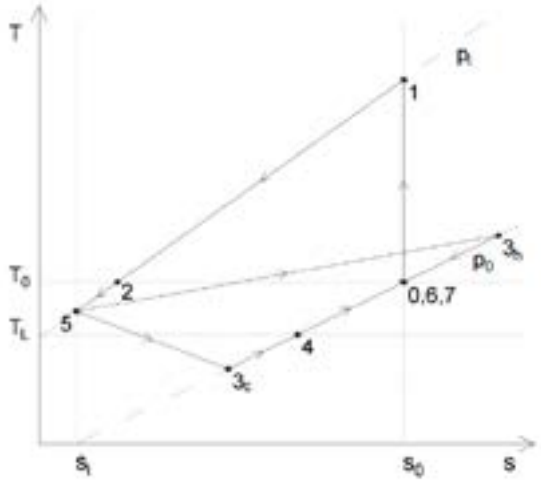


Figura 5. Diagrama T-s RCCVT

Al igual que en el OCVT, se asumen eficiencias unitarias en la compresión y en los intercambios de calor. Por la naturaleza de los equipos que se agregaron, un recuperador aislado y un intercambiador de calor que únicamente entrega calor al ambiente, el $\mathrm{COP}^{\mathrm{RCCVT}}$ se obtiene del mismo modo que el del ciclo abierto (Ec. 5).

La comparación entre el RCCVT y el OCVT debe realizarse para la misma carga térmica ($\mathrm{T_L}$) y el mismo consumo energético ($\mathrm{r_p}$). La existencia del recuperador incide en la temperatura de entrada al VT ($\mathrm{T_5}$), como surge del balance de energía en este equipo,

$$\mathrm{T_5 = T_0 - \varepsilon_c(T_0 - T_L)} \quad \mathrm{con\ T_2 = T_6 = T_0;\ T_4 = T_L} \qquad (6)$$

De la Ec. (6) surgen dos aspectos a considerar. Por un lado, $\mathrm{T_5}$ disminuye con el aumento de ε_c y con la disminución de $\mathrm{T_L}$ y, por otro, la corriente fría residual tiene una mayor capacidad refrigerante a medida que la temperatura de la carga disminuye.

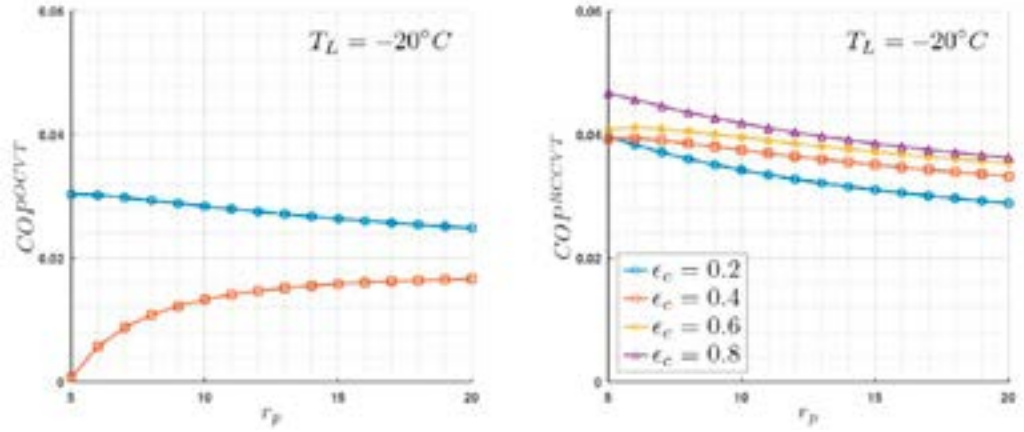
Finalmente, al introducir la ecuación (6) en (1a) (con $\mathrm{T_5 = T_i}$), puede obtenerse la expresión de $\mathrm{T_c}$ ($\equiv \mathrm{T_{3c}}$ en la Fig. 5) para el RCCVT. Cabe aclarar que, en estas condiciones, se requerirá un análisis específico del efecto de los parámetros ε_c, $\mathrm{r_p}$ y $\mathrm{T_L}$ sobre el valor de $\mathrm{T_c}$ factible de ser alcanzado y, claramente, el mínimo no se corresponderá con $\varepsilon_c = 0.2$.

ANÁLISIS DE INFLUENCIA

Para analizar el desempeño de las configuraciones OCVT y RCCVT en forma comparativa, es necesario estudiar la influencia de los parámetros operativos ($\mathrm{T_L}$, $\mathrm{r_p}$ y ε_c) sobre sus funcionamientos. Todos los resultados presentados corresponden a un VT con un $\eta_x = 1.5\%$. Un caso particular de análisis es aquel en el cual la temperatura de la carga térmica es la del ambiente, $\mathrm{T_L = T_0}$. En este caso, al anularse la capacidad refrigerante residual, el sistema RCCVT se comporta en forma idéntica al OCVT. Cabe destacar que, en estas condiciones, la

eficiencia máxima del sistema se alcanza para $\varepsilon_c = 0.60$, valor que coincide con lo reportado en estudios previos [4]. Simultáneamente, el COP experimenta una caída importante cuando se incrementa r_p (ver Ec. 5), debido a que el aumento de energía requerida para la compresión supera significativamente al incremento de la capacidad refrigerante, lo que indica limitaciones prácticas para su implementación en regímenes de alta presión.

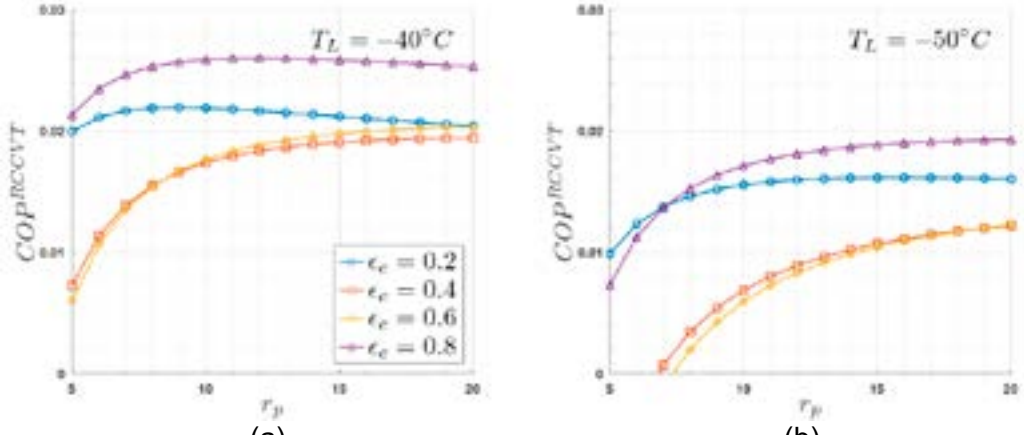
En las Figs. 6a y b se presenta la variación del COP de las alternativas OCVT y RCCVT, respectivamente, en función de r_p, con paramétrica ε_c, para una carga térmica de congelación ($T_L = -20°C$). Puede observarse que los valores $\mathrm{COP}^{\mathrm{RCCVT}}$ resultan apreciablemente mayores que los $\mathrm{COP}^{\mathrm{OCVT}}$ en todo el rango de r_p para todos los valores de ε_c. Asimismo, la incorporación del recuperador traslada el punto óptimo de operación del VT hacia fracciones frías más elevadas (i.e., $\varepsilon_c = 0.80$), posibilitando incrementar la utilización de energía para refrigeración.



(a) (b)

Figura 6. Comparación de desempeño térmico (OCVT vs. RCCVT)

Simultáneamente, en la Fig. 6a puede observarse que no se presentan las curvas correspondientes a $\varepsilon_c > 0.40$ dado que no es posible operar para $T_L = -20°C$ y que se alcanza la máxima eficiencia para $\varepsilon_c = 0.20$. En este sentido, el RCCVT permite extender la capacidad de refrigeración a cargas térmicas de mayor exigencia, es decir, en condiciones criogénicas ($-40°C$ y $50°C$), tal como se muestra en las Figs. 7a y b.



(a) (b)

Figura 7. $\mathrm{COP}^{\mathrm{RCCVT}}$ vs r_p

En términos de los valores del $\mathrm{COP}^{\mathrm{RCCVT}}$, los reportados en las Fig. 7a y b resultan considerablemente inferiores a los correspondientes a la Fig. 6b. Simultáneamente, el comportamiento de $\mathrm{COP}^{\mathrm{RCCVT}}$ frente a r_p se modifica, mientras que para cargas de congelación ($T_L = -20°C$) incrementar la presión (i.e., r_p) perjudica el desempeño, para

cargas criogénicas ($T_L = -50°C$) sucede lo opuesto, justificando así su uso en este último tipo de aplicaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desempeño del Tubo Vortex (VT) en un contexto de su aplicación, incorporando la carga térmica (T_L) y el consumo energético (r_p) como variables para su modelado, lo que permitió introducir como alternativa el RCCVT. Esta presenta dos ventajas: una de carácter operativo, que implica el cierre del ciclo termodinámico para permitir la operación con distintos gases de trabajo, superando una limitación del OCVT; y la otra, relacionada al aprovechamiento de la capacidad refrigerante residual del OCVT, a través de la inclusión de un recuperador.

El desarrollo del RCCVT demostró ser una estrategia de mejora integral, al incrementar el coeficiente de desempeño significativamente respecto al OCVT para cargas térmicas en el rango de congelación ($T_L = -20°C$) y ampliar el rango operativo del sistema hasta alcanzar temperaturas criogénicas ($T_L = -50°C$). Estos avances son particularmente relevantes en sistemas de refrigeración localizada, como componentes electrónicos críticos. Simultáneamente, el desplazamiento del punto de operación óptimo hacia fracciones frías elevadas —gracias al recuperador— maximiza la capacidad de enfriamiento.

Finalmente, se identificó un comportamiento particular en aplicaciones criogénicas: el aumento de r_p compensa parcialmente la caída de eficiencia asociada a la reducción de T_L, un fenómeno que contrasta con el deterioro observado del OCVT para esas condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP 2005 y UNLP (PID 11/I177). NJM es investigador del CONICET.

REFERENCIAS

[1] EXAIR, “CATALOG 35. Vortex Tubes & SpotCooling”, 2023.

[2] R. Manimaran, “Review of vortex tube: a sustainable and energy separation device for multi-purpose applications”, *Australian Journal of Mech. Eng.*, 21:1, 27–55, 2020.

[3] G.F. Nellis and S.A. Klein, “The Application Of Vortex Tubes to Refrigeration Cycles”, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Paper 537, 2002.

[4] J. M. Penillas, F. J. Suarez, G. Pary, C. Bosc, and N. J. Mariani, “Caracterización macroscópica del funcionamiento de un Tubo Vortex”, 6° Jornadas - ITEE 2021.



GESTIÓN**GESTIÓN**GESTIÓ

DIAGNÓSTICO ESTADISTICO DE LAS TRECE CARRERAS DE INGENIERÍA DE LA UNLP

Carola Ré; Di Domenicantonio Rossana; Marcos Actis

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 1 y 47, La Plata (B1900TAG), Buenos Aires, Argentina
rossanadido@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En un mundo complejo como el actual, las ingenierías dan respuesta a diversas y variadas problemáticas. En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata se dictan trece carreras (Tabla 1) estratégicas para el desarrollo tecnológico nacional que, a partir de una formación integral, facilitan que los graduados puedan insertarse en un mercado laboral y académico cada vez más dinámico. Tal como lo plantea el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), “las nuevas demandas para la ingeniería exigen una permanente innovación para la inclusión, con políticas más proactivas y programas académicos disruptivos, flexibles y adaptables, alineados con las expectativas de la sociedad en cuanto a la formación de profesionales” [1].

Tabla 1. *Las trece carreras de la facultad de Ingeniería*

Aeroespacial	Electromecánica	Energía Eléctrica	Hidráulica	Mecánica
Agrimensor	Electrónica	Materiales	Industrial	Química
Civil	Computación	Telecomunicaciones		

Con el objetivo de efectuar un diagnóstico del estado de situación y analizar el impacto de diversas políticas de ingreso, retención y egreso implementadas en la unidad académica, la Secretaría de Articulación Educativa y Seguimiento Académico (Secretaría de AE y SA) llevó a cabo un relevamiento que abarcó distintas aristas.
Entre otros indicadores se analiza periódicamente el crecimiento y evolución de los inscriptos y egresados de todas las carreras de nuestra institución como así también se analiza qué carreras tienen más graduados; cuáles son las especialidades más elegidas y cuáles han mostrado mejores resultados desde una perspectiva de género. Además, se llevan adelante encuestas anónimas a los más de seis mil estudiantes que realizan materias con el fin de obtener opiniones acerca de las asignaturas, manteniendo un seguimiento periódico de lo que sucede en las más de trescientas materias que se dictan en cada período lectivo. Este tipo de monitoreo institucional responde a la necesidad de generar datos confiables para tomar decisiones informadas y promover procesos de mejora continua.

DESARROLLO

La gran cantidad de alumnos, docentes y no docentes que transitan la Facultad de Ingeniería de la UNLP dan cuenta de la importancia de obtener informes estadísticos para poder monitorear el avance académico en las trece carreras de esta institución. Para ello, se utilizan los datos obtenidos a través de diferentes reportes provistos por los sistemas de gestión académica. Estos sistemas son mantenidos por el Centro Superior para el Procesamiento de la Información (CeSPI) de la UNLP. Los datos con los que se realizó el presente trabajo se obtuvieron del Sistema SIU Guaraní[1], SIU Kolla y Pentajo, los cuales

[1] SIU-Guaraní - 3w. Módulo de Gestión Académica - versión 3.22 – Abril 2025

recopilan datos de los estudiantes (actividades académicas), de los docentes (asentamiento de notas) y de las encuestas implementadas y procesadas por la institución. Estos sistemas contemplan el nuevo paradigma educativo en el que los avances tecnológicos cobran cada vez mayor protagonismo al interior de las universidades.
Al finalizar cada período lectivo se implementan encuestas anónimas y optativas donde cada estudiante puede dejar las opiniones sobre la cátedra y los docentes que tuvo en cada materia. De esta manera, se recopila información que luego es procesada y estandarizada. Esta información se difunde a través de los medios institucionales con el fin de obtener retroalimentación para mejorar la enseñanza en futuros dictados de las materias. Los datos recolectados también sirven para realizar un seguimiento de problemáticas recurrentes manifestadas por los estudiantes. Esto ha llevado a implementar acciones de mejora como la redistribución de estudiantes por comisiones, la implementación de bandas horarias con mayor demanda o reuniones con docentes de cátedras con dificultades para evaluar estrategias de mejora. Las opiniones recolectadas sobre las materias se difunden en la página web de la facultad y las de los docentes se difunden a cada uno de ellos en la intranet personal de cada docente quienes acceden con usuario y clave. Para que los datos recopilados tengan validez institucional y se garantice la transparencia de la información, es importante destacar que los sistemas SIU Guaraní y SIU Kolla deben estar debidamente actualizados y sincronizados, asegurando que los estudiantes solo completen encuestas sobre las materias y docentes que tuvieron. Es por ello que los datos son validados por el Cespi, por la Secretaría de AE y SA que las implementa y por las autoridades de la institución y de cada carrera previo a la difusión de los resultados.
Cada año la Facultad de Ingeniería realiza la inscripción de los ingresantes según la Resolución de la Universidad Nacional de La Plata y se registran alrededor de 1800 nuevos estudiantes que deciden estudiar alguna de las trece carreras de la oferta académica. A estos alumnos que presentan la documentación correspondiente en tiempo y forma, se les otorga el número de legajo (número de alumno) con el cual se identifica su historial académico en los sistemas de gestión antes mencionados. Los que completen todas las materias y requisitos del plan de estudios en el cual se inscribieron pasarán a ser egresados y obtendrán el título de ingeniero/a correspondiente.
Es importante para las autoridades, directores de cada carrera e integrantes de diferentes acciones en la institución disponer de datos cuantitativos actualizados y reales con el fin de poder realizar el seguimiento académico de la institución en la que transitan un importante número de estudiantes.
Hay características e indicadores que año a año se repiten en los perfiles de estudiantes y otros que van cambiando como son, por ejemplo, las carreras más demandadas, la nacionalidad, género, lugar de procedencia, familias de primera generación con carreras universitarias, necesidad laborar del estudiante, entre otros.
Entre las características de interés podemos mencionar la actividad académica de los estudiantes, con ello se contempla la cantidad de inscripciones, aprobación de cursadas, finales u otras actividades académicas del plan de estudios; la tasa de permanencia y retención mayoritariamente en los primeros años, seguimiento de cohortes, y de egresados de cada una de las carreras.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados cuantitativos estudiados para luego elaborar algunas conclusiones y futuras acciones que deriven de los datos.
En relación con los ingresantes de la cohorte 2025 que esta institución recibió, podemos observar en la Figura 1 que las carreras más elegidas fueron Aeroespacial, Industrial y Computación. Se consideraron los inscriptos por cohorte según los números de legajos correspondientes (sin alumnos re inscriptos y sin considerar cambios de carrera posteriores). Si se considera un análisis por género en la misma figura se puede observar que las carreras más elegidas por las mujeres en el año 2025 fueron Industrial,

Aeroespacial, Civil y Química, siendo las carreras de Química y Materiales elegidas por más mujeres que varones. En forma global el 27,6% de los ingresantes 2025 son del género femenino, el 72,2% del género masculino y el 0,2% es no binario según los datos registrados en el sistema donde los ingresantes completan los datos personales.
También hay reportes del Siu Guaraní que informan que el 87,7% de los ingresantes 2025 son argentinos mientras que el 12,3% son extranjeros. Asimismo, del total de estudiantes argentinos, el 92% de ellos tienen localidad de origen en la provincia de Buenos Aires y de ese porcentaje, el 60% residen en la Ciudad de La Plata.

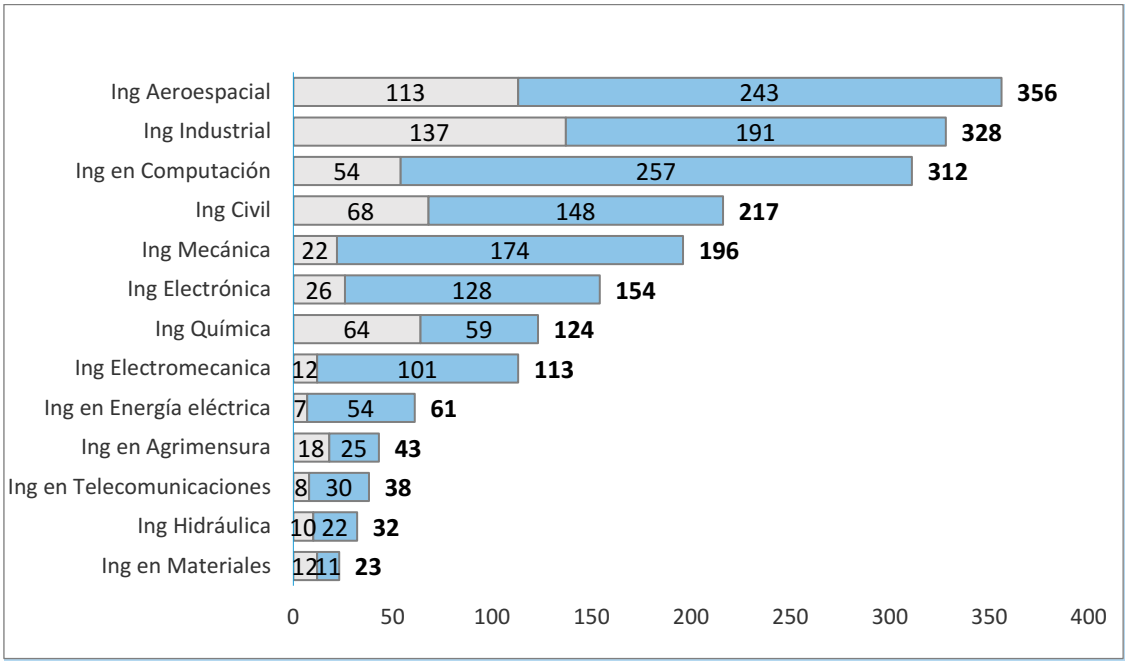


Figura 1 *Distribución de Inscriptos por carrera y género de la cohorte 2025*

Si realizamos un análisis comparativo sobre las inscripciones a las distintas carreras en los últimos años podemos obtener algunos patrones. Se observa que, desde el 2019 al 2025, la evolución de las inscripciones a las carreras registra un aumento relativo del 16%.

Tabla 2 *Inscripciones históricas a las carreras de la FI (Elaboración propia)*

Año/Carrera	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ing Aeronáutica/aeroespacial	129	250	298	284	326	441	356
Ing Civil	302	290	219	246	221	209	217
Ing en Agrimensura	61	54	33	43	47	50	43
Ing Electromecánica	98	115	105	126	146	126	113
Ing Electrónica	153	142	132	135	129	142	154
Ing en Computación	270	335	352	438	379	317	312
Ing Electricista/Energía eléctrica	54	60	53	47	37	67	61
Ing en Materiales	34	29	25	29	18	25	23
Ing en Telecomunicaciones	25	31	17	32	20	28	38
Ing Hidráulica	19	26	21	20	19	13	32
Ing Industrial	226	257	218	273	270	272	328
Ing Mecánica	161	137	123	138	181	204	196
Ing Química	185	169	153	148	143	169	124
Ingresos totales	**1.717**	**1.895**	**1.749**	**1.959**	**1.936**	**2.063**	**1.997**

Respecto de los egresados de las diferentes carreras de esta casa de estudio, debemos tener en cuenta que el período lectivo para el Ministerio de Educación de la Nación

considera del 1 de abril al 31 de marzo de cada año[2]. Analizando la cantidad de egresados del año 2024 (con cierre el 31-4-25) podemos observar que Industrial, Civil y Química han obtenido la mayor cantidad de graduados.
En cuanto al análisis de egreso según el género, se puede observar que las carreras con mayor cantidad de mujeres egresadas fueron Industrial, Química y Civil. En las carreras Materiales y Química, obtuvieron su título más mujeres que varones manteniendo la tendencia de ingresantes.

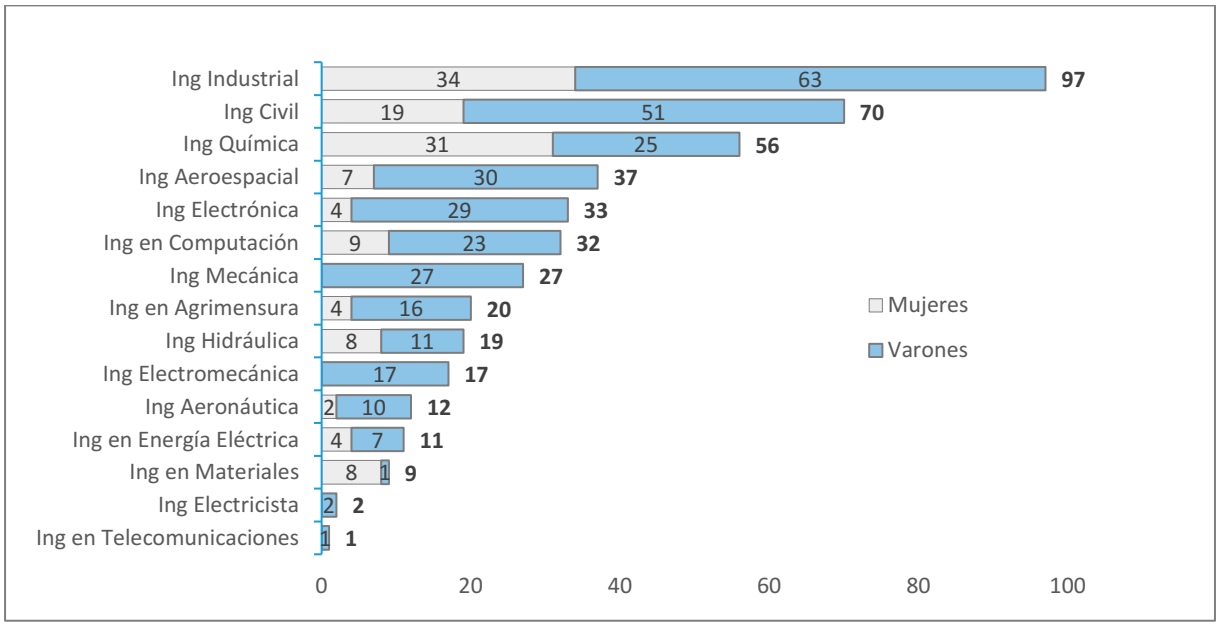


Figura 2 *Distribución de egresados por carrera y género del año 2024*

Considerando los egresos de los últimos años (del 2019 al 2024), se puede observar en la Tabla 3 un aumento relativo en el número de graduados de un 22%. También se destaca que Ingeniería en Computación tuvo un incremento del 113%, la carrera de Energía Eléctrica del 450% y la de Aeroespacial del 68% respecto del año anterior.

Tabla 3 *Egresados/as histórico 2019-2024 (Elaboración propia)*

Año/Carrera	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ing Aeronáutica	19	23	21	17	12	12
Ing Aeroespacial				14	22	37
Ing Civil	59	53	92	77	60	70
Ing en Agrimensura	37	18	22	24	20	20
Ing Electromecánica	23	12	12	24	25	17
Ing Electrónica	21	19	22	39	29	33
Ing en Computación	26	22	25	30	15	32
Ing Electricista	13	11	5	16	2	2
Ing en Energía eléctrica					2	11
Ing en Materiales	17	4	9	14	11	9
Ing en Telecomunicaciones				1	2	1
Ing Hidráulica	15	8	26	43	20	19
Ing Industrial	70	71	65	110	92	97
Ing Mecánica	23	27	14	18	21	27
Ing Química	39	49	50	47	33	56
Egresos totales	**362**	**317**	**363**	**474**	**366**	**443**

[2] Datos que reporta el Cespi al Ministerio de Educación mediante el sistema SIU - ARAUCANO

La implementación de encuestas a los alumnos sobre la actividad en las cátedras se realiza en la institución desde el año 2008. A partir del año 2016 se realizan a través del sistema SIU-Kolla, herramienta adoptada por su versatilidad para realizar relevamientos sobre distintas problemáticas del ámbito universitario. Actualmente la Facultad de Ingeniería utiliza la versión 4.8.2 de manera sincronizada al sistema Siu Guaraní 3w, con importantes mejoras de interfaz de preguntas a los alumnos. Actualmente se están procesando los resultados de las encuestas sobre materias y docentes del 2º cuatrimestre del 2024 que en esta oportunidad se realizó de manera optativa y anónima para los estudiantes. Se recibieron 5736 formularios y en cada uno de ellos hay opiniones sobre la materia y los docentes que en ella estuvieron. Al procesar esos formularios se obtuvieron 12.233 registros sobre materias y 30.617 sobre docentes. Esto nos da cuenta de que hay un importante número de alumnos realizando actividades académicas de manera activa y comprometiéndose en dar opiniones sobre las materias que están realizando.
Cabe destacar que la información del presente trabajo puede sufrir algunas mínimas variaciones dado que hay alumnos por ejemplo que deciden darse de baja de la carrera o cambiarse a otra ingeniería, o pierden la regularidad, y por ello estos datos reflejan la realidad al mes de Abril de 2025.

CONCLUSIONES

Creemos que es importante realizar informes de los datos estadísticos de la Facultad, así las autoridades, directores de carrera y otros miembros de la comunidad educativa puedan conocer y generar, dentro de sus posibilidades, estrategias de mejora, de fortalecimiento y de retención de los estudiantes que desean graduarse en nuestra institución. Para procesar datos de manera sistemática, es fundamental que los sistemas estén actualizados y contengan datos educativos certeros en bases de datos confiables y reales. Esto requiere la colaboración de estudiantes, docentes y no docentes.
A partir del análisis de datos relevados con los sistemas Pentajo y Siu Guaraní se elaboran los cuadros mostrados en el presente trabajo como así también seguimiento de cohortes, información sobre encuestas de materias, reporte de alumnos regulares en la carrera, u otros para las distintas necesidades y acciones de mejoras.
Es importante destacar que la Facultad ofrece un abanico de recursos y herramientas que han logrado un buen impacto sobre estudiantes y sus necesidades, combatiendo la deserción y estimulando el estudio. Entre las acciones de mejoras educativas implementadas podemos mencionar la elaboración de videos sobre las carreras con el fin de difundirlas, planes de mejora en el egreso como el Plan Delta Fi, desdoblamiento de comisiones en materias masivas, difusión sobre el mito del género en carreras de ingeniería, acompañamiento por parte de la Prosecretaría de Asuntos Estudiantiles y/o el área social, entre otros.
La información actualizada y confiable es fundamental para obtener indicadores que permitan una visión más precisa de las características de nuestros estudiantes. Observar sus prioridades, potencialidades, desafíos, conflictos y limitaciones permitirá ajustar los planes de estudio a las necesidades específicas de las carreras de ingeniería.

REFERENCIAS

[1] Reflexiones sobre las nuevas demandas para la ingeniería latinoamericano. CONFEDI. 2021. (https://confedi.org.ar/download/LibroReflexionesNvasDemandas.pdf)

[2] Anuario estadístico estudiantes de carreras de grado y pregrado de la UNLP Año académico 2023 realizado por la Secretaría de Asuntos Académicos y la Dirección de Seguimiento de las Trayectorias Estudiantiles.

[3] Resumen Ingresantes y Egresados/as por carrera del período 2019-2023 realizado por la Secretaría de Articulación educativa y Seguimiento Curricular. (https://ing.unlp.edu.ar/grado/seguimiento-curricular-documentos/)

[4] Gurmendi, M. D. L. (2014). Uso de los sistemas informáticos SIU en la gestión administrativa.

[5] Menéndez, M – Gurmendi L. (2012). Sistemas para la toma de decisiones en el ámbito universitario. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/124502

[6] Díaz, F. J., Osorio, M. A., Venosa, P., Macia, N., & Amadeo, P. (2015). Seguridad Proactiva en los Sistemas de Gestión e Información académica: el caso de la UNLP.

[7] R. Di Domenicantonio, A. González, M. Actis (2012). Empleo del Siu-Guaraní y el Siu-Data Warehouse como apoyo a decisiones académicas en las carreras de ingeniería, Capítulo de Gestión de la Educación en Ingeniería, I Congreso Argentino de Ingeniería - CADI. ISBN 978-987-1312-46-7

EXPERIENCIAS DE GESTIÓN EN EL ÁREA DE EXTENSIÓN

Martiarena Juan Francisco, Sánchez Facundo, Aquín Manuel, SerroelsFlorencia

Integrantes de la Secretaría de Extensión 2022-2024.

Calle 1 y 47, juan.martiarena@ing.unlp.edu.ar

Resumen

El presente trabajo se enmarca dentro del desarrollo de la gestión en la Secretaría de Extensión en el período comprendido entre abril de 2022 y 2024, e intenta analizar el impacto de la práctica de la extensión en nuestra facultad. Además, los datos presentados forman parte del informe bienal de gestión que hemos adoptado como parte de sistematización de nuestro trabajo.

En primer lugar se realiza una caracterización y evaluación cuantitativa y cualitativa de indicadores que dan cuenta de la cantidad de proyectos activos, de equipos interdisciplinarios extensionistas, y de cómo es la composición e integración de estos equipos. Con este panorama, interesa analizar las maneras en las que los proyectos y actividades promueven el desarrollo de la extensión y aportan a la visibilización y legitimación de la universidad en su contexto socio-cultural.

Junto con esto, se analizan los principales ejes que articulan el desarrollo de la extensión a nivel institucional, su integración con otros pilares de nuestra universidad (docencia e investigación), se evalúa el impacto de las políticas adoptadas por la secretaría, y se proponen lineamientos para aportar a la planificación estratégica del área en virtud de jerarquizarla y fortalecerla.

Introducción

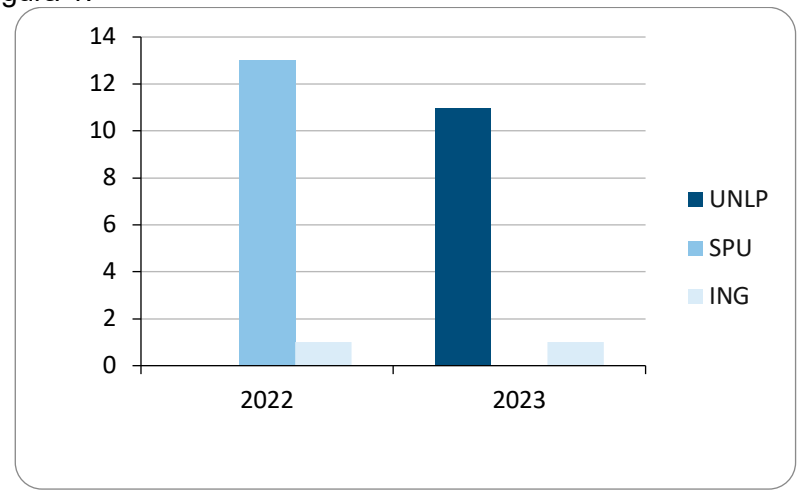
La **extensión universitaria** es el principal instrumento con el que cuenta la universidad para realizar su función social, herramienta mediante la que se pretende contribuir al desarrollo comunitario a partir de la integración de los conocimientos generados. Se trata de entender a la universidad como protagonista de las transformaciones sociales, cumpliendo un rol activo en la satisfacción de las demandas requeridas por la comunidad. En este proceso de transformación, es importante analizar el diálogo que se establece entre quienes se encuentran dentro del ámbito académico con aquellas expresiones de organización de la sociedad (asociaciones, clubes, organizaciones sociales, etc), y cuales son los instrumentos con los que se cuenta para poder hacerlo.

Las demandas surgidas desde las **entrañas de la sociedad** deben ser consideradas como **elementos articuladores** entre el desarrollo de las actividades de extensión y la investigación y la docencia, nutriendo las actividades universitarias de inquietudes y contenidos generados por el devenir de la sociedad. En este trabajo se analiza la revitalización del área a partir de la recuperación de las actividades presenciales en 2022, tanto hacia adentro de nuestra facultad como en el establecimiento de nuevos vínculos con actores externos, y cuales son los ejes específicos que contribuyen al desarrollo particular de la extensión en una facultad con las características como la nuestra.

Caracterización y evaluación de la extensión en Ingeniería

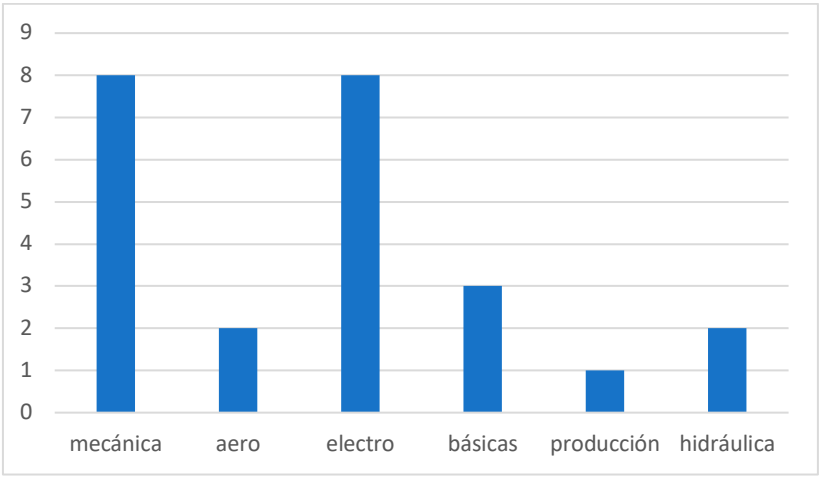
La extensión como actividad presenta una discusión que en principio refiere a lo discursivo pero cuando se profundiza el debate trasciende a lo conceptual. Los proyectos que en el

informe se analizan desde lo cuantitativo pertenecen a la esfera de lo que denominamos Extensión, aunque el enfoque que cada uno construye puede ser diferente.
Estos proyectos se enmarcan dentro de una serie de elementos normativos que facilitan su clasificación y evaluación, siendo un primer indicador importante la acreditación de los mismos por alguno de los organismos que contienen al desarrollo de las actividades universitarias. En el período bajo análisis, los proyectos acreditados según los principales organismos se muestra en la figura 1.



1 Proyectos acreditados según convocatoria

Puede observarse en la figura *2* el departamento de origen de cada uno de los proyectos:



2 Proyectos presentados según departamento de origen1

Además de los proyectos presentados, se encuentran en ejecución cuatro programas de extensión, que cuentan con un período de acreditación tetraanual. En la Tabla 1 se presentan estos programas.

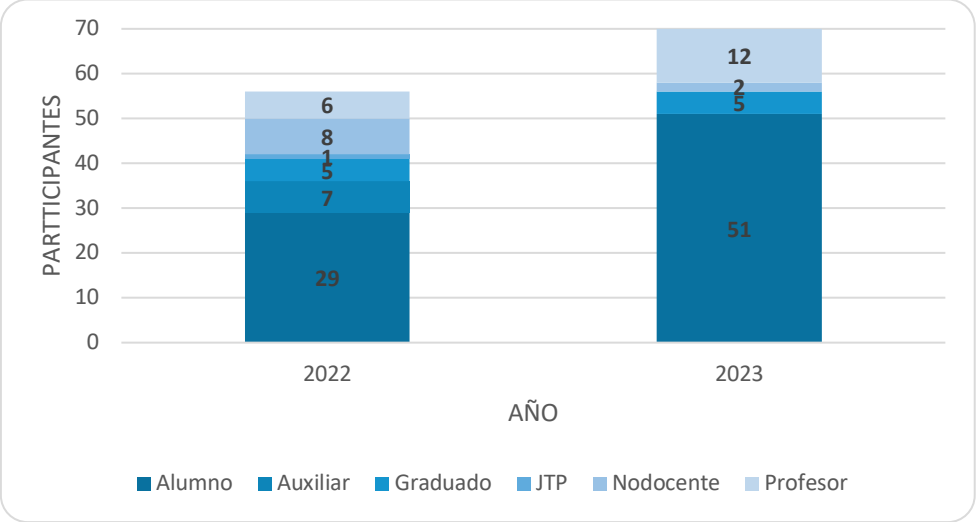
Nombre del programa
Ñandú (acreditado en la convocatoria 2023)
LATE (acreditado en la convocatoria 2023)

[1] Se grafican los presentados en las convocatorias de SPU y UNLP en el bienio resumido.

Construimos Radio (acreditado en la convocatoria 2023)
Robótica en el Aula (acreditado en la convocatoria 2023)

Tabla 1 Programas acreditados

En la figura *3* se muestran la cantidad de participantes por claustro en los proyectos presentados a las distintas convocatorias:



3 Cantidad de participantes por claustro

Las actividades de extensión de nuestra Facultad se desarrollan fundamentalmente alrededor de programas o convocatorias que son las que financian la ejecución de los proyectos.
Como rasgo general, puede decirse que el surgimiento de los proyectos y actividades de extensión se da a partir de reconocer en el otro demandas, intereses y necesidades. Existen distintos proyectos que abordan temáticas educativas, asistencia a la producción, mejoras del hábitat y la calidad de vida, etc., que realizan sus actividades fuera del ámbito académico y en permanente diálogo con actores que no son habitués de los claustros universitarios. Esta práctica tiende a desarrollar y allanar el camino para consolidar un modelo de extensión en el que la agenda de trabajo se conforme a partir del diálogo y la reflexión con la sociedad, favoreciendo la producción conjunta de saberes. Este enfoque de trabajo debe ser considerado en el marco del desarrollo de diferentes políticas públicas, pensando a la universidad como una parte importante integrante de proyectos de gestión estatal.
Tal como se analiza en informes de períodos anteriores, la convocatoria anual que sostiene la Secretaría de Extensión Universitaria (SEU) de la UNLP sigue siendo la principal herramienta para el desarrollo de proyectos. Esta convocatoria, de duración bienal, nuclea equipos de trabajo que realizan sus actividades extensionistas, organizados en torno a un proyecto cronológicamente ordenado. La convocatoria extraordinaria está pensada por la SEU como una herramienta para el fortalecimiento de áreas prioritarias, valor que se ha comenzado a implementar en la convocatoria 2023 (ejecutada a partir del 2024).
También por parte de la UNLP se ha lanzado una nueva línea denominada de Actividades de Extensión, cuyo espíritu es fomentar la aparición de nuevos equipos de trabajo y el abordaje de nuevas temáticas. Durante el año 2023 se realizaron 5 actividades de extensión en el marco de la convocatoria de la SEU.
Otra modalidad que también ha sido estimuladora para las actividades de naturaleza extensionista es aquella relacionada a fuentes de financiamiento externas a la UNLP, en donde se destacan aquellos programas que son financiados por la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU). Luego de un período sin contar con esta herramienta, la SPU realizó

convocatorias en 2021 y 2022. La convocatoria 2022, que contó con diferentes líneas, asignó recursos a 13 proyectos de nuestra unidad académica, como se observa en la figura 1.
En nuestra facultad, bajo la órbita del paquete normativo que encuadra las distintas formas que puede tomar la extensión (cursos, proyectos, programas, actividades, etc.) se realizaron menos proyectos que en el bienio anterior. Es importante señalar que muchos de los que se informaron en esta categoría en el informe anterior han tomado parte en alguna de las convocatorias mencionadas previamente. Así, se reconoce como un instrumento para acercar a nuevos equipos de trabajo en extensión y promover la participación de todos los claustros.
Dentro de las formalidades requeridas en las convocatorias se requiere la asignación de una cátedra de referencia. Este requisito permite múltiples interpretaciones pero vamos a quedarnos aquí con la idea de que abre una puerta para incorporar la extensión al conjunto de manera integral al resto de las funciones institucionales, hacia una más efectiva combinación de la enseñanza, la investigación y la extensión con la perspectiva de afianzar el compromiso de los actores universitarios.
En cuanto a la distribución de proyectos según el departamento de origen, se registra la participación de 6 de los 10 departamentos que conforman nuestra unidad académica.
Del mismo modo que se señala en los informes correspondientes a los bienios anteriores, las actividades de extensión registradas alcanzan un pequeño porcentaje del universo de docentes, estudiantes, nodocentes y graduados que componen a nuestra unidad académica. Es notorio el predominio del claustro estudiantil en la participación de las actividades. En lo que refiere al universo docente, el relevamiento de los informes de mayores dedicaciones advierte que sobre las 297 mayores dedicaciones, 37 consignan tareas vinculadas con la extensión (Tabla 2).

Departamento	MD con actividades de extensión
Electrotecnia	3
Materiales	9
Construcciones	0
Producción	0
Química	1
Aeroespacial	2
Agrimensura	3
Mecánica	9
Hidráulica	6
Básicas	4
Total	37

Tabla 2 Mayores dedicaciones por área departamental

De manera periférica se desprenden de la realización de los proyectos la producción de nuevos saberes específicos. En parte estos se han documentado y han generado producciones académicas que resultaron publicadas en congresos y/o revistas (Tabla 3). Otras han pretendido colectivizar los conocimientos creados y preservados en la universidad con el conjunto de la sociedad y se estructuraron en distintos cursos, seminarios y talleres (Tabla 4). Resulta de utilidad analizar estos ejes bajo diferentes dimensiones que contribuyan a profundizar su estudio. Un aspecto interesante es aquel que categoriza este tipo de

actividades como instancias de educación formal alternativa. Bajo este concepto se pretende abordar la falta de inclusión en los esquemas de educación formal de la universidad. La posibilidad de compartir instancias de formación según los procesos y modos institucionales utilizados en los ámbitos educativos formales con actores que no los frecuentan habitualmente prioriza su inclusión.

Año	Publicaciones
2022	7
2023	11

Tabla 3 Publicaciones generadas en el marco de proyectos

Año	Cursos	Seminarios	Talleres	Total
2022	6	-	6	12
2023	6	1	11	18

Tabla 4 Cursos, seminarios y talleres

Perspectivas de desarrollo y conclusiones

El recorrido extensionista de nuestra facultad tiene trayectoria temporal que ha trascendido el alcance en nuestra facultad y se ha proyectado hacia otros espacios. Nuestra institución es reconocida por sus aportes a la consolidación de distintos instrumentos de gestión a nivel universitaria, lo que demuestra la existencia de un perfil eminentemente social dentro de la matriz de actores que la conforman. No obstante, se observa cierta reserva para que las actividades de extensión formen parte de la cotidianeidad de nuestras tareas.

La recuperación de la actividad presencial a partir del inicio del período analizado brindó un fuerte sustento para retomar áreas de trabajo o abrir nuevas experiencias. También se sostuvo la participación de los proyectos y programas acreditados ante la UNLP y con la reactivación del financiamiento para programas por parte de la Secretaría de Políticas Universitarias se recuperó la participación en las distintas convocatorias.

Como orientación general para la formulación de nuevos proyectos, es necesario fortalecer el desarrollo desde las cátedras, con el objetivo de instituir a la extensión dentro de las actividades de la vida universitaria. Esto implica, para los docentes, incorporarlas a la planificación del curso y generar estrategias que integren los procesos de enseñanza, junto con los de investigación y extensión. Si bien la mayoría de los proyectos cuentan con anclaje en alguna de las cátedras de nuestra facultad, queda pendiente que las actividades de extensión atraviesen de manera generalizada las actividades pensadas para el aula. Desde ya que esto va acompañado de un cambio en las formas de enseñanza y aprendizaje, ya que el proceso formativo busca desarrollarse a partir del diálogo con diferentes problemáticas que se encuentran afuera del aula. Esta idea es necesario desarrollarla de manera conjunta en instancias de gestión universitaria superiores, ya que apunta a incorporar de forma curricular a las actividades de extensión. La integración de la universidad en la implementación de políticas públicas debe entenderse a través de la articulación de las personas que forman parte de las organizaciones que intervienen. Es decir, definido el marco institucional a través del que se facilita la integración y la articulación de funciones es primordial el abordaje de los sujetos que son quienes materializan las iniciativas.

Este proceso de transformación no puede ni debe ser abordado de manera aislada, sino que es necesario que forme parte de un proceso de debate de alcance nacional y regional para modelar la evolución del sistema universitario latinoamericano.

En cuanto a la realización de propuestas educativas áulicas, todavía resta inscribirlas dentro de un marco institucional más abarcativo. La concepción de las mismas bajo la categoría de educación formal alternativa brinda un marco que por un lado nos posicionaría en línea con lo

que se viene impulsando a nivel universidad, mientras que introducir esta discusión puertas adentro de nuestra unidad académica significa un buen punto de partida para colectivizar el debate y asumirnos como potenciales aportantes a la propuesta académica de manera integral.
También se hace necesario profundizar en la documentación de las experiencias, fomentar la publicación de las mismas y su valoración dentro de las evaluaciones. La creación de instrumentos de registro, ordenamiento y sistematización de las actividades de extensión y los productos derivados de ellas sigue siendo un tema pendiente en el abordaje de la gestión. Las propuestas de formación en el área específica de la extensión que ha lanzado la Secretaría de Extensión de la UNLP es una opción inmediata para ser utilizada y comenzar a remediar este aspecto.
La descripción y análisis compartida en el presente trabajo invita a todos a reflexionar sobre que maneras de diálogo y vinculación podemos fomentar con actores sociales en tiempos en los que proliferan discursos degradantes contra la institución. Quizás desde una mirada integral podamos ampliar y/o consolidar el campo de intervención hacia organizaciones sociales, gobiernos municipales, empresas del sector público y privado, etc., aportando significativamente a la cohesión social para profundizar la democracia y la diversidad socio-cultural.

Bibliografía

Iparraguirre, María Mercedes. *Buscar a los que no vienen: ampliación de la agenda universitaria y diseño organizativo*. 2020. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.

Bonicatto, M., Iparraguirre, M., Santin, M., Serrichio, S., & Otero, A. (2021). La educación formal alternativa (EFA) y la virtualización en el marco de la pandemia. *Escenarios*, (34).

Tommasino, H., & Rodríguez, N. (2011). Tres tesis básicas sobre extensión y prácticas integrales en la Universidad de la República. *Integralidad: tensiones y perspectivas*, 19.

Bruno, D. P. (2016). Curricularizar la extensión para integrar y territorializar la práctica universitaria. *Cuadernos De H Ideas*, Vol. 10 (2016).



VINASINST.MALVINASINST

DISEÑO DE REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA RECUPERACION SECUNDARIA

Arrieta Zuccalli, María B.[1], Bianchi, Gustavo L.[1,2]

1. Grupo Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería UNLP, Diagonal 80 N° 372, La Plata (1900), Argentina. E-mail: belen.arrieta@ing.unlp.edu.ar
2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

1. Introducción

La industria de extracción de petróleo y gas consume grandes cantidades de agua, (Estrada & Bhamidimarri, 2016) especialmente en la fractura hidráulica, generando efluentes con alta conductividad y contaminantes como sales, hidrocarburos y metales pesados. (Mohammad-Pajooh et al., 2018). Ante esta problemática, la electrocoagulación se presenta como una solución atractiva debido a su eficiencia energética, menor uso de químicos y capacidad para tratar efluentes con alta conductividad (Ganzoury et al., 2022). Este proceso utiliza electrodos de aluminio o hierro para generar iones metálicos que actúan como flóculos, eliminando contaminantes y reduciendo la turbidez. La electrocoagulación es un tratamiento que ha demostrado ser útil en un amplio número de efluentes, tanto en colorantes y tinturas de la industria textil (Özyonar et al., 2020), sílice e iones de aguas de pozo (López et al., 2019), efluentes de industrias alimenticias (Sharma et al., 2020), entre otros. El objetivo del presente trabajo es proponer el desarrollo de un reactor electroquimico y su estudio para optimizar tanto la técnica de tratamiento, como la fluidodinámica involucrada en el proceso, resultando fundamental el estudio y la caracterización del flujo ~~dentro de los reactores~~, como puede ser por el análisis de CFD, para validar y optimizar el rendimiento del sistema (Fernando F. Rivera, 2021).

2. Parte experimental

2.1 Diseño de equipo

Por razones de practicidad constructivas, anteriormente estudiadas en otros prototipos, y fácil implementación en escala de laboratorio, se optó por un sistema de estructuras que se denominan “externa” e “interna”, donde la externa se corresponde a una cañería de acrílico, y la estructura interna se corresponde a un relleno modular, el cual fue optimizado al máximo para tener una sección efectiva de circulación de flujo, y una sección de albergue de electrodos de material Aluminio, que estarán por el lado efectivo, en contacto con el fluido, y por la conexión eléctrica aisladas físicamente de la sección de trabajo interna.

En la **Figura 1** que se presenta a continuación, se el plano del sistema ensamblado, y en un corte que permite apreciar la sección lateral, se puede ver el camino que va recorriendo el flujo, serpenteando en el interior del conducto, generando un tiempo de contacto con los electrodos, y un recorrido suave, que persigue evitar acumulación de fluido en el interior del conducto. El diseño de la unidad modular, que conforma la estructura interna, consta de unidades denominadas “modulares”, las cuales se deben ensamblar para completar un módulo final. Los mismos fueron construidos mediante una impresora 3D empleando como material ácido polilactico (PLA).

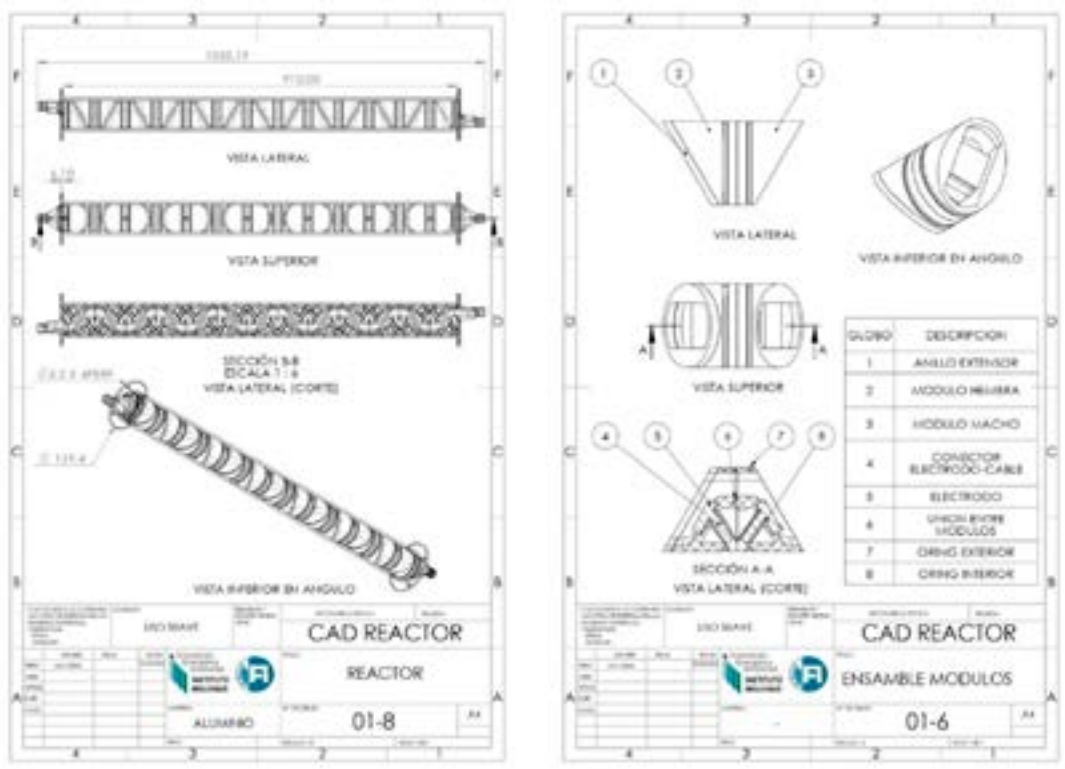


Figura 1. Planos con secciones y vistas para visualizar el reactor, con cotas principales y ensamble de las dos mitades que conforman el modulo

El modulo de ensamblado consiste en dos mitades que se unen para optimizar los tiempos de impresión, y facilitar la colocación de los electrodos de Aluminio. En la vista lateral, se puede observar la zona de recubrimiento con el plástico, que protege y aísla la sección de conexión eléctrica del electrodo.

El montaje de los módulos con los electrodos se lleva a cabo utilizando sellador de silicona lo que permite asegurar una fijación estable y sellada. Posteriormente, los módulos se ensamblan dentro del tubo de acrílico, procurando una correcta alineación de los módulos con los orificios perforados en el tubo, necesarios para las conexiones eléctricas externas.

Para garantizar la estanqueidad en la interfase módulo-tubo acrílico, se implementa una técnica específica para el montaje de los parches, la cual consiste en aplicar sellador de silicona en el perímetro de las perforaciones donde hacen contacto con los módulos y dejarlo secar, tras lo cual se coloca el parche por encima haciendo presión sobre la silicona ya seca que actúa como una goma. La sección sobresaliente del parche ejerce presión sobre el sellador gracias a la implementación de abrazaderas, logrando así un sellado efectivo y duradero.

Para garantizar la estanqueidad en la zona exterior del conducto de acrílico, el diseño y construcción de un "parche" (**Figura 2**) resulto fundamental. Este accesorio mejora el sellado de los puntos de conexión eléctrica en la interface módulo-tubo de acrílico, asegurando la estanqueidad del conjunto. A los parches se les introducen insertos diseñados para contener el tornillo de conexión eléctrica.

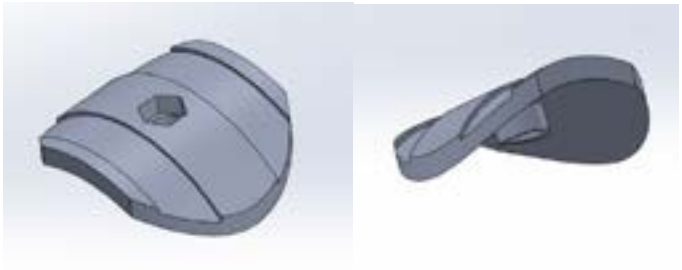


Figura 2: Representación grafica de los parches en SolidWorks

Luego del ensamblado de todas las partes del equipo, tanto la colocación de los módulos interiores como todo el sistema de sellado externo, se realizaron ensayos de estanqueidad, donde se verifican los puntos de unión para detectar posibles filtraciones. En la **Figura 3** se presenta el equipo completamente ensamblado



Figura 3: Ensamble del reactor

2.2 Determinación de tiempo de residencia

Los modelos de flujo pistón y de mezclado perfecto son dos modelos ideales fundamentales para el diseño y análisis de reactores. Aunque estos modelos simplifican el diseño, los reactores reales a menudo presentan desviaciones significativas (Cristian D. Bahl, 2012). El análisis de la de distribución del tiempo de residencia (DTR) es una de las principales herramientas para evaluar el rendimiento hidráulico de las unidades de tratamiento de aguas (Edmilson Costa Teixeira, 2008). Una técnica importante para determinar la DTR es el método de estímulo-respuesta, que consiste en aplicar una perturbación controlada al reactor, ya sea en forma de señal escalón o mediante la inyección de un pulso de un trazador. El trazador debe ser una sustancia que no reaccione ni se transfiera a otras fases, y debe ser detectable a bajas concentraciones (como colorantes o radioisótopos) (T. Ntambwe Kambuyi, 2021). La inyección debe tener lugar durante un período muy corto en comparación con los tiempos de residencia del reactor o del sistema de reactores, y debe haber una cantidad insignificante de dispersión entre el punto de inyección y la entrada al reactor (H. Scott Fogler, 2020).

Para este estudio, se utilizó un pulso perfecto de un trazador de Naranja de metilo, que fue elegido debido a que, en la curva de calibración estudiada, se observó una tendencia lineal entre la concentración y la absorbancia (R^2 =0.986). Se empleó una solución madre de 5000 ppm. El volumen de inyección utilizado fue de 2,5 ml, siendo el volumen efectivo del reactor de 320 ml, representando el volumen de inyección una pequeña proporción respecto al volumen del equipo. El tiempo optimo de inyección determinado para lograr el comportamiento de un pulso de perturbación fue de 3 segundos.

Por ultimo, se automatizó la recolección de muestras. El tiempo de recolección de muestras esta vinculado al caudal de trabajo, el cual fue de 1,19 l/min y se evaluaron 32 concentraciones, resultando la diferencia de tiempo entre muestras de 3 segundos.

Resultados y discusión

El postratamiento de los datos obtenidos de los ensayos de DTR se realizó mediante un script de MATLAB, para graficar los puntos de concentración y tiempo, y como datos de entrada incorporando el caudal de trabajo y el volumen del reactor, se calculan distintos índices hidráulicos, como sin el t10, t90 y Mo, los cuales, contrastando con bibliografía (Edmilson Costa Teixeira, 2008) nos permite analizar si el sistema se encuentra en presencia problemáticas en la distribución de flujo, como pueden ser de corto circuitos o volúmenes muertos. La curva resultante del ensayo, se ~~la~~ contrasto con las curvas teóricas del modelo de flujo de dispersión axial, a fin de encontrar un parámetro característico para determinar el comportamiento fluidodinámico del reactor.

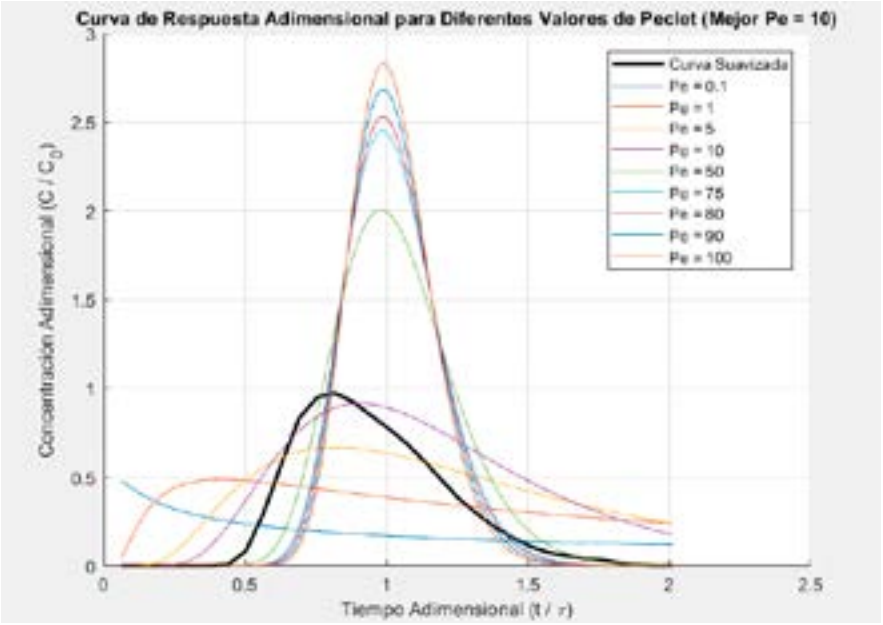


Figura 4: Curvas teóricas del modelo de dispersión axial y curva experimental obtenida

El parámetro característico del modelo de dispersión axial es el numero adimensional Peclet (Ariane Bérard, 2019) y el valor que mejor se ajusta para este sistema es un valor de Pe=10.

Los valores fueron t10 (adimensional): 0.57, t90 (adimensional): 0.76, M0: 0.59, donde el t10 se asocia con la presencia de corto circuitos, el t 90 con la retención de fluido o recirculación y Mo con el grado de mezcla, y según los rangos evaluados en la tabla1 (Edmilson Costa Teixeira, 2008)

Efficiency	θ_{10}	θ_{90}	Mo
Poor	<0.5	>2.8	>3.5
Compromising	0.5–0.7	1.7–2.8	2.5–3.5
Acceptable	0.7–0.8	1.3–1.7	1.5–2.5
Excellent	>0.8	<1.3	<1.5

Tabla 1: rango de valores y clasificación de los índices hidráulicos

Se puede concluir que los índices t90 y Mo entran en un rango aceptable, mientras que el t10, tiene un valor que se encuentra en la región pobre, razón por la cual es necesario analizar y proponer modificaciones que permitan mejorar la condición de corto circuito en el equipo, como puede ser realizar ensayos con caudales dentro de rangos que eviten regímenes de transición (entre laminar y turbulento), ya que estos favorecen inestabilidades.

Conclusiones

El diseño y construcción del reactor presentó varios desafíos, en especial por la relación de compromiso que existe entre la facilidad de construcción: elementos que sean fáciles de adquirir y mantener, como así también adecuar el diseño para que exista una conexión eléctrica segura y estanca, optimización fluidodinámica vinculada el diseño del equipo que maximice el recorrido del flujo, evitando así acumulación de materia o zonas de recirculación, y las especificaciones del tratamiento electroquímico, como lo son la distancia inter-electródica adecuada para que la caída óhmica se mantenga en un rango bajo.

Los resultados obtenidos hasta el momento permitieron determinar una curva de respuesta del diseño propuesto, permitiendo obtener conclusiones sobre las variables del sistema, y como se pueden extrapolar los datos para contrastar con resultados simulados en un software comercial, y así validar el modelo físico con el fluidodinámico.

Bibliografía

Estrada, J. M., & Bhamidimarri, R. (2016). A review of the issues and treatment options for wastewater from shale gas extraction by hydraulic fracturing. *Fuel*, *182*, 292–303. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.051

Mohammad-Pajooh, E., Weichgrebe, D., Cuff, G., Tosarkani, B. M., & Rosenwinkel, K. H. (2018). On-site treatment of flowback and produced water from shale gas hydraulic fracturing: A review and economic evaluation. *Chemosphere*, *212*, 898–914. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.145

Ganzoury, M. A., Ghasemian, S., Zhang, N., Yagar, M., & Lannoy, C. De. (2022). Chemosphere Mixed metal oxide anodes used for the electrochemical degradation of a real mixed industrial wastewater. *Chemosphere*, *286*(P1), 131600. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131600

Özyonar, F., Gökkuş, Ö., & Sabuni, M. (2020). Removal of disperse and reactive dyes from aqueous solutions using ultrasound-assisted electrocoagulation. *Chemosphere*, *258*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127325

López, R. L., Coreño, O., & Nava, J. L. (2019). Abatement of hydrated silica and simultaneous removal of coexisting ions from deep well water by electrocoagulation using an up-flow reactor. *Journal of Water Process Engineering*, *32*(August), 100923. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100923

Sharma, S., Aygun, A., & Simsek, H. (2020). Electrochemical treatment of sunflower oil refinery wastewater and optimization of the parameters using response surface methodology. *Chemosphere*, *249*, 126511. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126511

Fernando F. Rivera, Tzayam Pérez, Locksley F. Castañeda, José L. Nava, Mathematical modeling and simulation of electrochemical reactors: A critical review, Chemical Engineering Science, Volume 239, 2021, 116622, ISSN 0009-2509, https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116622.

Bahl, C.D., Gely, M.C., & Pagano, A.M. (2012). Patrones de Flujo en Reactores Químicos: Desarrollo de Modelos Matemáticos y Numéricos Basados en CFD.

Edmilson Costa Teixeira, Renato do Nascimento Siquiera (2008) Performance Assessment of Hydraulic Efficiency Indexes,J Journal of Environmental Engineering, P 851-859, V 134, N 10,

https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:10(851)

T. Ntambwe Kambuyi, B. Bejjany, B. Lekhlif, H. Mellouk, K. Digua, A. Dani, Design of a continuous-flow single-channel reactor using optimal experimental data from batch reactor for turbidity removal by electrocoagulation, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 9, Issue 1, 2021, 104651, ISSN 2213-3437, https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104651.

Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

Gualtieri, Carlo, and Renato Siqueira. “Discussion of ‘Performance Assessment of Hydraulic Efficiency Indexes’ by Edmilson Costa Teixeira and Renato Do Nascimento Siqueira.” Journal of Environmental Engineering (2010): n. pag. Print.

Experimental methods in chemical engineering: Residence time distribution-RTD. Canadian Journal of Chemical Engineering, 98 (4), 848-867. https://doi.org/10.1002/cjce.23711

DISEÑO Y FUTURAS MODIFICACIONES DE UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA REUSO DE RECHAZO DE ÓSMOSIS INVERSA

Alvarez, Juan Martín[1], Bianchi, Gustavo Luis[1,2]

1. Grupo Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería UNLP, Diagonal 80 N° 372, La Plata (1900), Argentina. E-mail: juanmartin.alvarez@ing.unlp.edu.ar
2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Introducción

La ósmosis inversa (OI) es un proceso de filtración que utiliza una membrana semipermeable para eliminar impurezas y sales disueltas en el agua, permitiendo el paso del agua pura mientras retiene los contaminantes [1]. La aplicación más usual de este proceso es la purificación de agua para su uso en calderas (puesto que la salida de la OI puede alcanzar directamente los requerimientos necesarios para estos equipos), aunque también se emplea en la obtención de agua ultrapura para industrias como la alimenticia, la farmacéutica y la electrónica, la recuperación de metales de corrientes de proceso y la concentración de productos como el caso de los endulzantes [2]. La OI genera dos corrientes de salida: una de ellas se denomina “permeado” y es la corriente con menor concentración de sólidos, mientras que la otra se conoce como “rechazo” (ROI) y es la corriente en la que se concentran todos los sólidos disueltos separados. El porcentaje de ROI depende de las condiciones del agua alimentada, y puede ser tan bajo como un 10% para el caso de aguas subterráneas salobres [3] (debido a su menor presión osmótica y riesgo de incrustación) así como incrementarse hasta un 90% en el caso de aguas de mar [4] (donde el alto contenido de sólidos disueltos puede causar incrustaciones en la membrana y su rotura). Dos de los parámetros más relevantes para evaluar el ingreso al tratamiento por OI son la dureza y la concentración de sílice. Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} que conforman la dureza del agua pueden precipitar como carbonatos o sulfatos [5], y la polimerización de los iones silicato conduce a la formación de incrustaciones [6], dos efectos perjudiciales para la integridad de la membrana que producen taponamientos o roturas de las mismas.

En virtud de lo anteriormente discutido, una estrategia propuesta para reutilizar el agua de ROI es realimentarla al sistema mezclándola con el agua alimentada al sistema de OI, la cual suele ser agua de pozo (AP). Debido a que la corriente ROI tendrá una mayor concentración de iones que el ingreso a la OI, es necesario un tratamiento previo para evitar que la nueva concentración de dureza y sílice que ingresará a la OI sea demasiado alta para las membranas. La electrocoagulación (EC) ha probado ser útil en la remoción de estos contaminantes en numerosos casos [7, 8, 9, 10, 11]. Esta tecnología se basa en la disolución electrolítica de ánodos de un metal como el hierro o el aluminio, los cuales liberan cationes polivalentes en solución que permiten la coagulación y posterior floculación de la materia coloidal en suspensión [11]. En el cátodo se produce la evolución de gases que producen un efecto DAF que asiste al proceso de separación de los contaminantes [12]. Para el caso de ánodos de aluminio, las ecuaciones pertinentes son:

$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	ánodo	Ecuación 1
$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-}$	cátodo	Ecuación 2

La EC permite la separación del grueso de la materia coloidal presente en el agua a tratar, así como de los iones polivalentes presentes en la misma. Los parámetros más importantes para establecer en la EC son el pH del tratamiento [13] (el cual afecta la naturaleza de las

especies metálicas presentes en el medio) y la corriente de trabajo, la cual establece la concentración de los cationes metálicos dosados al agua a tratar según:

$$\left[Al^{3+}\right] = I\,.\,t\,.\,27gr/mol\,/(96500\,C/mol\,.\,3\,.\,V) \qquad \text{Ecuación 3}$$

$$\left[Al^{3+}\right] = I\,.\,27gr/mol\,/(96500\,C/mol\,.\,3\,.\,Q_V) \qquad \text{Ecuación 4}$$

La ecuación 3 hace referencia a un tratamiento en batch, donde I es la corriente aplicada, t es el tiempo que dure la EC y V es el volumen de efluente mientras que la ecuación 4 es aplicable a tratamientos en continuo, y Qv es el caudal de efluente. Dada la importancia de la corriente como variable operativa se establece que todo tratamiento por EC debe ser galvanostático en vez de potenciostático. El esquema a implementar en planta se presenta en la **Figura 1**. Tras la salida de la OI se purga una parte del rechazo para evitar la sobreconcentración en el tiempo de contaminantes al reingresar esa agua al sistema, y la fracción restante es la corriente ROI a tratar por EC.

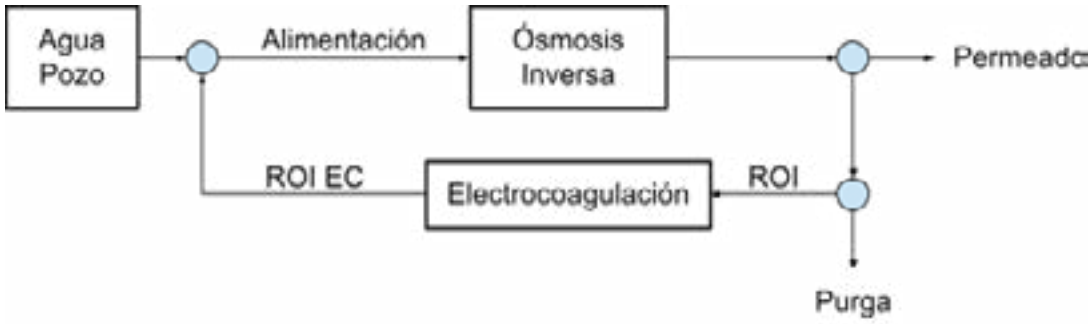


Figura 1. Esquema de reciclo y tratamiento por EC.

Parte experimental

Se evaluó la tratabilidad del efluente realizando una serie de ensayos en batch utilizando un volumen de 0,2 litros y una corriente de 0,5 amperes. Se ensayaron distintas combinaciones de pH y concentración de aluminio [Al^{3+}]. Esta concentración se determinó a partir de la ecuación 3 empleando el volumen y corriente de trabajo antes mencionados, variando el tiempo del tratamiento. Previo a cada ensayo se ajustó el pH del efluente al valor deseado mediante el agregado de ácido sulfúrico 1M o hidróxido de sodio 1M según correspondiese, determinando el pH con un pHmetro Apera pH 700. El efluente se sometió a agitación mediante un buzo magnético para asegurar la correcta distribución de los cationes Al^{3+} liberados, y la corriente se suministró con una fuente Keithley 2260-B. El sistema empleado para el tratamiento es el que se esquematiza en la **Figura 2**. Luego de cada ensayo se dejó decantar durante 15 minutos antes de tomar muestra de la fase clarificada. Los ensayos se realizaron por duplicado y se informó el valor promedio de cada parámetro medido.

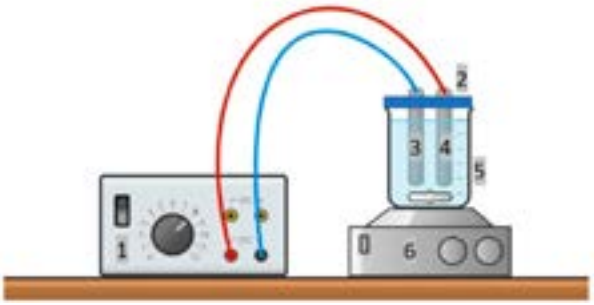


Figura 2. Sistema de EC. 1: fuente de corriente. 2: tapa de PLA. 3-4: ánodo y cátodo de aluminio. 5: reactor de vidrio borosilicato. 6: agitador magnético.

La determinación de conductividad se realizó con un conductímetro Apera EC 700, la dureza se determinó mediante el método titrimétrico con EDTA SM 2340-C, la sílice por el método espectrofotométrico SM 4500-SiO_2 C y el aluminio remanente por el método 3500-Al B de eriocromo cianina R. En la **Tabla 1** se presenta la caracterización fisicoquímica del efluente ROI.

Tabla 1. Caracterización del efluente ROI.

Parámetro	Valor
pH	7.5
Dureza (mg/L)	1005
Sílice (mg/L)	149.5
Conductividad (µS/cm)	1095

Resultados y discusión

En la **Tabla 2** se resumen los resultados obtenidos con los ensayos a diferentes combinaciones de pH y [Al^{3+}]. Si bien usualmente el mejor rango de trabajo para la EC con aluminio suele ser un pH alrededor del neutro [5, 8, 10, 13], en este caso el mejor pH para remover la dureza y la sílice fue 11. Esto puede deberse a que en los procesos de OI se suele incorporar una concentración baja de quelantes para que mantengan en solución a los iones que pueden producir incrustaciones en la membrana, con lo cual se dificulta la remoción por EC de estos iones; sin embargo, otros aniones fuertes (como fosfatos, silicatos o, en este caso por emplear un pH alto, los hidroxilos) pueden desplazar a los quelantes y producir precipitados insolubles [2]. De las opciones de tratamiento evaluadas, se selecciona al tratamiento a pH 11 y 42 mg/L de Al^{3+}, ya que, si bien con el tratamiento a 69,9 mg/L de Al^{3+} se obtienen resultados incluso mejores, la corriente necesaria es un 67% mayor, y el tratamiento a 42 mg/L de Al^{3+} ya es aceptable.

Tabla 2. Esquema de ensayos de EC.

pH	[Al^{3+}] (mg/L)	Dureza (mg/L)	Sílice (mg/L)	[Al^{3+} remanente] (mg/L)
6	14,0	970	110.6	0.46
6	42,0	955	100.5	0.55
6	69,9	910	85.6	0.51
7.5	14,0	920	98.2	0.63
7.5	42,0	865	83.6	0.65
7.5	69,9	803	50.9	0.57
9	14,0	786	58.1	0.64
9	42,0	705	26.9	0.92
9	69,9	632	7.7	0.78
10	14,0	665	49.6	0.68
10	42,0	446	23.72	0.76
10	69,9	365	4.56	0.68
11	14,0	355	35.6	0.28
11	42,0	97	2.28	0.47
11	69,9	20	0.15	0.65

A partir del esquema mostrado en la **Figura 1**, junto a los datos del agua de pozo alimentada al sistema y los datos del tratamiento a pH 11 y 42 mg/L de Al^{3+} se construye el balance de materia que se encuentra en la **Tabla 3**. En color azul se marcaron las variables de decisión del sistema, como el caudal de permeado y los porcentajes de recuperación, paso de sales y retorno, relacionados al funcionamiento del sistema de OI; en amarillo se marcaron los datos de las corrientes de trabajo conocidas y en verde los parámetros que fueron calculados a través de balances de materia. Debido a que no se ha establecido una ecuación que relacione la efectividad de la remoción obtenida por EC en términos de concentraciones de ingreso y variables operativas, se compara al valor del efluente ROI (**Tabla 1**) con la corriente "Salida", calculada como el valor que tendrá la salida del rechazo tras la OI al mezclar las corrientes de Agua Pozo con ROI EC. Puede verse que, si bien el valor de dureza es alrededor de un 10% superior al que tiene el efluente tratado, el valor de sílice es prácticamente idéntico, con lo cual es válido sugerir que el sistema real se comportará de manera aproximada a lo establecido en el balance de materia.

Tabla 3. Balance de materia del sistema de reciclado de ROI.

	Agua Pozo	Alimentación	Permeado	ROI EC	Salida
Caudal (m3/h)	1.245	1.818	1.000	0.573	0.573
Dureza (mg/L)	495.00	369.63	13.44	97.00	1149.96
Sílice (mg/L)	70.50	49.01	1.78	2.28	152.48
[Al3+ remanente] (mg/L)	0.00	0.15	0.01	0.47	0.46
% Recuperación	55	Corriente necesaria (A)		71.6	
% Paso de sales	2	Consumo de electrodos (kg/h)		0.024	
% Retorno	70	Consumo mensual (kg)		5.77	

Dentro de la **Tabla 3** también se calculó la corriente necesaria empleando la Ecuación 4 para una concentración de Al^{3+} de 42 mg/L y el caudal de 0,573 m^3/h. De estos mismos datos se desprende el consumo de electrodos de aluminio por hora y, asumiendo una operación de 8 horas diarias durante 30 días al mes se calcula un consumo mensual de 5,77 kg de aluminio. El reactor actual cuenta con un mazo de cinco electrodos cilíndricos constituídos por un ánodo central y cuatro cátodos rodeándolo. Esta geometría es ineficiente desde el punto de vista electroquímico, ya que como puede verse en la **Figura 3** los electrodos cilíndricos al consumirse no solo aumentarán la resistencia óhmica (y, en consecuencia, el voltaje de trabajo para mantener la corriente deseada) por disminuir la distancia entre ellos, sino también por disminuir su área; este último efecto no sucede en los electrodos planos, y por ello es que se propone un cambio por esta geometría.

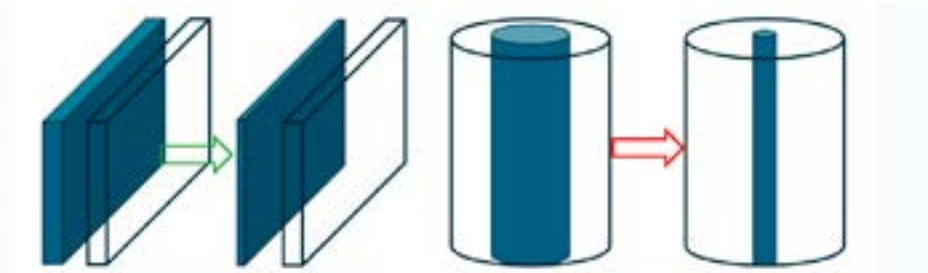
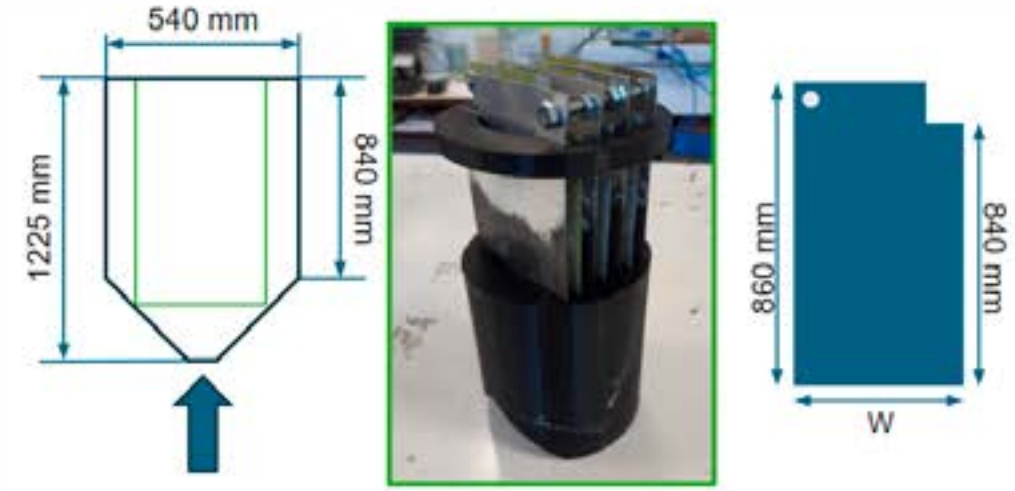


Figura 3. Diferencias dimensionales tras el consumo de los electrodos para distintas geometrías.



Distancia entre electrodos (mm)	20
Espesor de electrodos (mm)	6
Número de electrodos	16
Ancho de los electrodos W (mm)	396
Volumen por electrodo (m^3)	0.00204
Densidad aluminio (kg/m^3)	2700
Masa por electrodo (kg)	5.511
Masa total (kg)	88
Tiempo de recambio (meses)	9.17

Figura 4. Propuesta de nuevo dimensionamiento del equipo y estimación del número de electrodos y su tiempo de recambio.

Se propuso como futura modificación un modelo de mazo de electrodos paralelos con una perforación en una esquina y un corte cuadrado en la otra, de manera de alinear a todos los cátodos y conectarlos con una varilla y, de manera similar, conectar a todos los ánodos entre sí, como se esquematiza en la **Figura 4**. A partir de las medidas del reactor actual se estimó la cantidad de electrodos que podrían colocarse con este arreglo con una separación de 20 mm entre ellos, y considerando que los electrodos puedan operarse hasta un 60% de su peso como factor de seguridad (y alternando la polaridad para que todos los electrodos terminen siendo usados como ánodos) se aproxima un tiempo de recambio de los mismos de alrededor de 9 meses.

Conclusiones

La incorporación de un tratamiento por EC a la corriente ROI permite su reingreso al sistema y reducir el consumo de agua en la operación de OI. Tras una serie de ensayos en batch se determinó que, a pH 11 y empleando una concentración de Al^{3+} de 42 ppm, las concentraciones de dureza y sílice alcanzaron valores que permiten su reutilización en el sistema de ósmosis inversa. Con base en los ensayos anteriormente realizados se diseñó y construyó un reactor de EC que permite tratar hasta un caudal de 0.58 m^3/h. Se estableció una corriente de 72 amperes en el reactor para operar al caudal indicado, evaluando el consumo de los electrodos de aluminio en 5,77 kilogramos por mes de operación, estableciéndose así un esquema de parada de planta para el recambio de los mismos.

El cambio de los electrodos de una geometría cilíndrica a una plana permite no solo operar a menores voltajes, sino también operar el reactor de EC durante mayores tiempos antes del cambio de electrodos, por lo que es una modificación más que relevante para un rediseño del equipo actual.

Bibliografía

1. M. Elimelech et. al.,"The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment", *Science* (2011). DOI: 10.1126/science.1200488
2. Kucera, Jane. (2023). Reverse Osmosis 3rd Edition. DOI: 10.1002/9781119725183.
3. C. Fritzmann et. al., "State-of-the-art of reverse osmosis desalination", *Desalination* (2007). DOI: 10.1016/j.desal.2006.12.009
4. L. F. Greenlee et. al., "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Research* (2009). DOI: 10.1016/j.watres.2009.03.010
5. S. Zhao et al., "Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to Reverse Osmosis membranes", *Desalination* (2014). DOI: 10.1016/j.desal.2014.04.014
6. W. Hater et. al., "Silica scaling on reverse osmosis membranes — Investigation and new test methods", *Desalination and Water Treatment* (2011). DOI: 10.5004/dwt.2011.2340
7. Yu-Hsuan Liu et. al., "Electroprecipitation Mechanism Enabling Silica and Hardness Removal through Aluminum-Based Electrocoagulation", *ACS ES&T Engineering* (2022). DOI: 10.1021/acsestengg.1c00433
8. S. Zhi et. al., "Hardness removal by a novel electrochemical method", *Desalination* (2016). DOI: 10.1016/j.desal.2015.12.002
9. P. D. Nemade et. al., "Removal of Hardness from Drinking Water by Electrocoagulation Using Iron Electrodes", *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research* (2021). DOI: 10.30534/ijeter/2021/089112021
10. J.U. Halpegama et. al., "Concurrent removal of hardness and fluoride in water by monopolar electrocoagulation", *Journal of Environmental Chemical Engineering* (2021). DOI: 10.1016/j.jece.2021.106105
11. M. Mahmood et. al., "Influence of operating conditions on the removal of silica and hardness by continuous electrocoagulation", *Journal of Environmental Chemical Engineering* (2022). DOI: 10.1016/j.jece.2022.108899
12. N. M. Niza et. al., "Hydrodynamic study of bubble characteristics and bubble rise velocities in batch electrocoagulation with vibration-induced electrode plates using the PIV technique", *Separation and Purification Technology* (2021). DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118089
13. J. M. Alvarez et. al., "Combined electrocoagulation and electrooxidation treatment system for real effluents from the fishing industry", *Heliyon* (2023). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14906.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EMPLEANDO SISTEMA DE DISCO ROTANTE Y LOOP DE CORROSIÓN

Seijas, Carlos Javier; Bianchi, Gustavo Luis; Vega, Silvio

UIDET "Innovación Energética y Ambiental", Instituto Malvinas, Facultad de ingeniería, UNLP. Diagonal 80 N° 372,La Plata (CP: 1900)

carlosjseijas@gmail.com

Introducción

Los estudios electroquímicos con el cilindro rotatorio (MSR) evalúan la capacidad de adhesión del inhibidor a la superficie metálica. El loop de corrosión (LCT) representa la condición experimental más cercana a la realidad de la industria (problemas de corrosión, erosión, abrasión, fluidos bifásicos, tiempo en que el inhibidor trabaja, duración del efecto de pasivación, etc.). Los valores de velocidad de corrosión (Vc) son diferentes en ambos métodos y se debe a los fenómenos de fluidodinámica. El método con cilindro rotatorio se utiliza como un pre-screening y, posteriormente, se realiza el ensayo en loop de corrosión que define cuál inhibidor es el más adecuado para proteger al material, hasta el momento en que se desactiva.

La corrosión por dióxido de carbono (CO_2) es una de las formas de corrosión más estudiadas en la industria del petróleo y el gas. Esto generalmente se debe al hecho de que el petróleo crudo y el gas contienen algún nivel de CO_2. La principal preocupación con la corrosión por CO_2 en la industria del petróleo y el gas es que esta puede causar fallas en el equipo, especialmente en la tubería principal de fondo de pozo y en las tuberías de conducción y, por lo tanto, puede interrumpir la producción de petróleo/gas. La presencia de CO_2, agua libre y arena puede causar graves problemas de corrosión en los oleoductos y gasoductos (Nyborg, 2010). Cuando los productos de corrosión no se depositan en la superficie del acero, pueden ocurrir tasas de corrosión muy altas de varios milímetros por año. La velocidad de corrosión se puede reducir sustancialmente en condiciones en las que el carbonato de hierro ($FeCO_3$) puede precipitar sobre la superficie del acero y formar una película de producto de corrosión densa y protectora. Esto ocurre más fácilmente a alta temperatura o pH alto en la fase acuosa (Koteeswaran, 2010). La alta temperatura aumenta la velocidad de reacción que produce la capa protectora de productos de corrosión, reduciendo las velocidades de corrosión. El pH alto (baja acidez) reduce la descalcificación de la capa de productos de corrosión, lo que produce una baja tasa de corrosión (Garsany et al., 2002). El gas seco de CO_2 por sí mismo no es corrosivo a las temperaturas encontradas dentro de la producción de petróleo y gas. Debe disolverse en una fase acuosa para promover una reacción electroquímica entre el acero y la fase acuosa en contacto. El CO_2 es soluble en agua y salmueras. Sin embargo, cabe señalar que tiene una solubilidad similar tanto en la fase gaseosa como en la líquida de hidrocarburo. Así, para un sistema de fase mixta, la presencia de la fase de hidrocarburo puede proporcionar un depósito dispuesto de CO_2 a la partición en la fase acuosa. El CO_2 suele estar presente en los fluidos producidos. Básicamente, la corrosión por CO_2, es un proceso electroquímico de varios pasos entre las especies corrosivas que resultan de la disolución del CO_2 y las fases solubles en el acero.

Parte experimental

Se estudiaron inhibidores de corrosión en una concentración de 150 ppm. Del total, 4 son del tipo solubles en soluciones acuosas y 4 son solubles en soluciones acuosas con características espumantes. La solución NACE que se emplea está compuesta por las

siguientes sales: 9,62% NaCl, 0,45% $CaCl_2$, 0,19% $MgCl_2$, 89,74% H_2O. Para todos los ensayos realizados, la temperatura de trabajo fue de 65°C y saturado con CO_2.

Se realizaron los ensayos a escala de laboratorio para evaluar la eficiencia de los inhibidores sobre la velocidad de corrosión e incidencia al picado, por medio de curvas de polarización en condiciones dinámicas en una celda electroquímica. Para llevar a cabo las polarizaciones lineales, se utilizó el potenciostato-galvanostato de Metrohm AUTOLAB, con su respectivo software NOVA 2.1. La celda electroquímica consta de tres electrodos: un electrodo de referencia de AgCl/Ag en una solución de KCl 3M que, mediante un Luggin, se acerca al electrodo de trabajo, disminuyendo de esta manera la resistencia óhmica entre el electrodo de referencia y el de trabajo. Para el electrodo de trabajo, se utilizaron cilindros de acero al carbono; y, por último, se empleó un contraelectrodo de grafito. Todos los electrodos se encuentran sumergidos en la solución NACE. Para llevar a cabo los ensayos en condiciones dinámicas se hizo uso de un electrodo de disco rotante, formado por un vástago rotatorio. La velocidad de rotación a la que se trabajó fue de 3000 rpm.

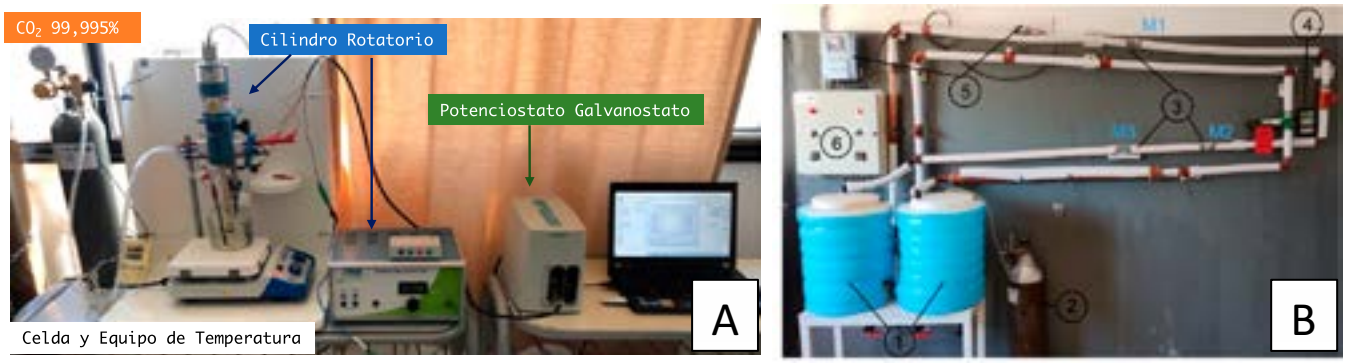


Figura 1. A) Muestra del equipo MSR usado en los ensayos. B) Banco de ensayos LCT. Partes principales: 1-Tanques de fluido de trabajo; 2-Tubo de CO_2; 3- Cupones de corrosión. 4- Corrosómetro; 5- Caudalímetro y sensor; 6- Tablero de potencia.

Para evaluar la eficiencia de los inhibidores se realizan mediciones de velocidad de corrosión por el método de resistencia a la polarización. Luego de la hora previa de saturación con el gas, se efectúa una medición de potencial a circuito abierto por otra hora, sin inhibidor, seguida del ensayo de resistencia de polarización entre -20 mV y +20 mV del potencial de circuito abierto. A los efectos de calcular la eficiencia se aplica la Ec. 1, donde VC es la velocidad de corrosión:

$$\textbf{Eficiencia} = \frac{\textbf{VC sin inhibidor} - \textbf{VC con inhibidor}}{\textbf{VC sin inhibidor}} * \mathbf{100} \qquad \textbf{Ec.1}$$

Para los ensayos dinámicos se utilizó el loop de corrosión que se muestra en la Figura 1-B). En estos ensayos se agrega inhibidor de corrosión por única vez (símil a un bach), por lo tanto, lo que se busca en este ensayo es definir cuándo el inhibidor comienza a inhibir y cuánto tiempo trabaja cumpliendo su función. Los ensayos fueron realizados a una temperatura de trabajo de 65ºC, saturado con CO_2, con una velocidad de flujo de 1 m/s. Se realizaron medidas de velocidad de corrosión electroquímica (LPR) y de velocidad de corrosión por pérdida de peso de las probetas, determinada con balanza analítica (este último parámetro corresponde a toda la duración del ensayo, no representa la realidad del inhibidor, el cual actúa en los primeros momentos hasta que se desactiva). También se monitorea una forma de ruido de corriente electroquímica (ECN) entre los electrodos, llamado imbalance (desequilibrio o tendencia a picaduras).

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados observados en los ensayos MSR usando los inhibidores solubles en agua; en la Tabla 2 empleando los inhibidores solubles y espumantes.

Tabla 1. Resultados en MSR empleando los inhibidores solubles.

Inhibidor (Marca)	pH	Ec (mV)	Ic (mA)	Vc (mm/año)	Eficiencia (%)	Morfología de ataque
Blanco NACE	4.7	-599.95	2.5148	11.8309	-	Altamente picado
CC-2 (Soluble)	4.67	-580.12	0.2373	1.1163	90.56	Picado
PC-8 (Soluble)	4.63	-591.92	0.1294	0.6089	94.85	Picado leve
HM-6 (Soluble)	4.73	-596.83	0.2474	1.1638	90.16	Altamente picado
LW-4 (Soluble)	4.71	-585.84	0.1275	0.5996	94.93	Sin picado

Tabla 2. Resultados en MSR empleando los inhibidores solubles y espumantes.

Inhibidor (Marca)	pH	Ec (mV)	Ic (mA)	Vc (mm/año)	Eficiencia (%)	Morfología del ataque
Blanco NACE	4.7	-599.95	2.5148	11.8309	-	Altamente picado
CF-2 (Soluble y espumante)	4.59	-567.83	0.2741	1.2895	89.1	Picado
PE-1 (Soluble y espumante)	4.06	-569.44	0.1121	0.5275	95.54	Picado moderado
HM-4 (Soluble y espumante)	4.47	-566.48	0.2359	1.1095	90.62	Picado
LE-6 (Soluble y espumante)	4.34	-561.74	0.1821	0.8567	92.76	Picado moderado

En la Figura 2 se presentan, a modo de ejemplo, diferentes morfologías de ataque en la superficie de las probetas luego de los ensayos en el MSR.

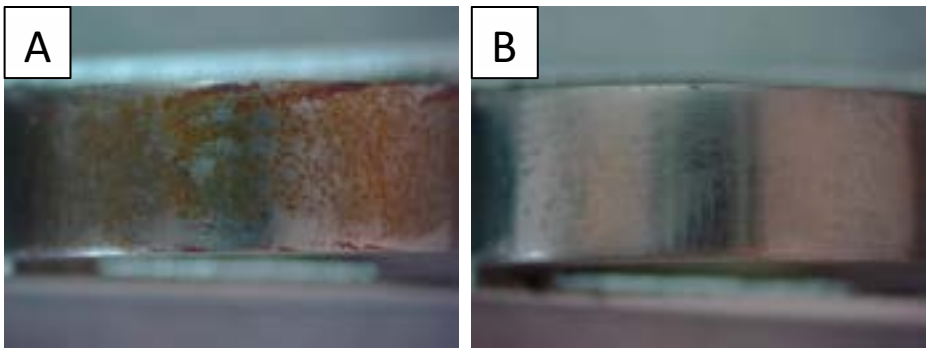


Figura 2. A) Probeta altamente picada. B) Probeta sin picado. 20X.

Completados los ensayos en MSR, en base a los resultados de la Tabla 1 y Tabla 2, se decidió evaluar la efectividad en loop de corrosión de los inhibidores PC-8, LW-4, PE-1 y LE-6 con el criterio de que estos inhibidores no producían picado o generaban moderado ataque

localizado. En la Tabla 3 se presentan el peso inicial, el peso final y la velocidad de corrosión por pérdida de masa para 3 probetas empleadas con cada inhibidor, junto con la duración del ensayo en horas.

Tabla 3. Velocidades de corrosión obtenidas de los ensayos en loop de corrosión.

Probeta	Tiempo (horas)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δm (mg)	Vc (mm/año)
Inh PC-8 Prob 1	52	1.88829	1.77722	111.07	37.36
Inh PC-8 Prob 2	52	1.60393	1.53516	68.77	22.73
Inh PC-8 Prob 3	52	1.74469	1.68706	57.63	19.35
Inh LW-4 Prob 1	117	1.3523	1.26945	82.85	12.39
Inh LW-4 Prob 2	117	1.95594	1.87307	82.87	12.17
Inh LW-4 Prob 3	117	1.79115	1.74741	43.74	6.53
Inh PE-1 Prob 1	45	1.84574	1.77125	74.49	30.25
Inh PE-1 Prob 2	45	1.32085	1.27948	41.37	19.96
Inh PE-1 Prob 3	45	1.70745	1.67493	32.52	12.16
Inh LE-6 Prob 1	28.5	2.06261	2.02673	35.88	22.78
Inh LE-6 Prob 2	28.5	1.48723	1.4659	21.33	13.01
Inh LE-6 Prob 3	28.5	1.53802	1.52416	13.86	8.59

En la Figura 3 se muestran casos representativos de las superficies de los cupones, luego del ensayo en el LCT, pudiendo apreciarse si se generaron depósitos de corrosión y/o picado.

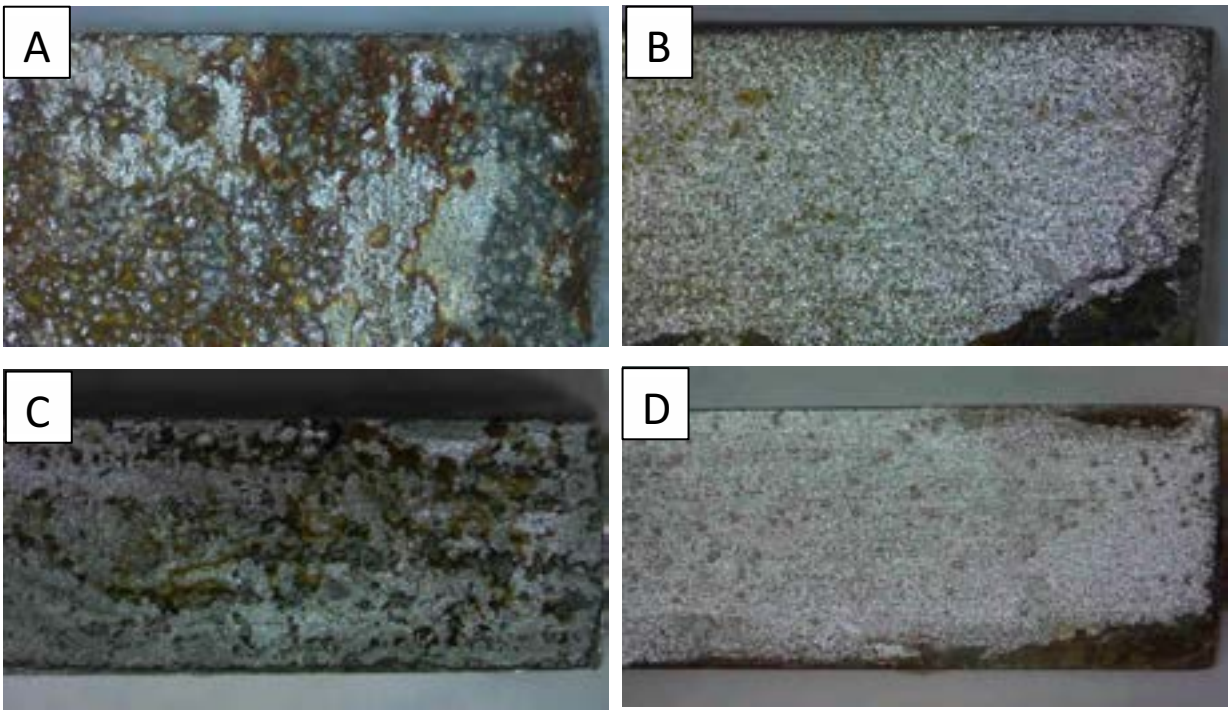


Figura 3. Superficie de las probetas luego del ensayo en loop de corrosión. A) Inh PC-8; B) Inh LW-4; C) Inh PE-1; D) Inh LE-6.

La Figura 4 muestra la evolución de los parámetros velocidad de corrosión e imbalance durante el tiempo de ensayo. En A) se ve que el Inh PC-8 inicia con muy baja velocidad de corrosión general, pero con picado, ya que los valores de imbalance son muy altos; después

de 30 minutos de ensayo tanto la corrosión general como el picado aumentan drásticamente. En B) se observa que el inhibidor Inh LW-4 durante 2,5 horas actúa adecuadamente (velocidades de corrosión menores a 1 mm/año) junto con un bajo imbalance, indicando que durante ese tiempo tampoco ocurre picado. Luego empieza a desactivarse aumentando tanto Vc como imbalance. En C), el Inh PE-1 desde que inicia presenta altos valores de velocidad de corrosión junto con alto picado, por lo que este inhibidor no resulta adecuado para utilizar en la solución NACE. En D) el Inh LE-6 desde que inicia el procedimiento presenta altos valores de velocidad de corrosión junto con alto picado, por lo que este inhibidor tampoco resulta adecuado.

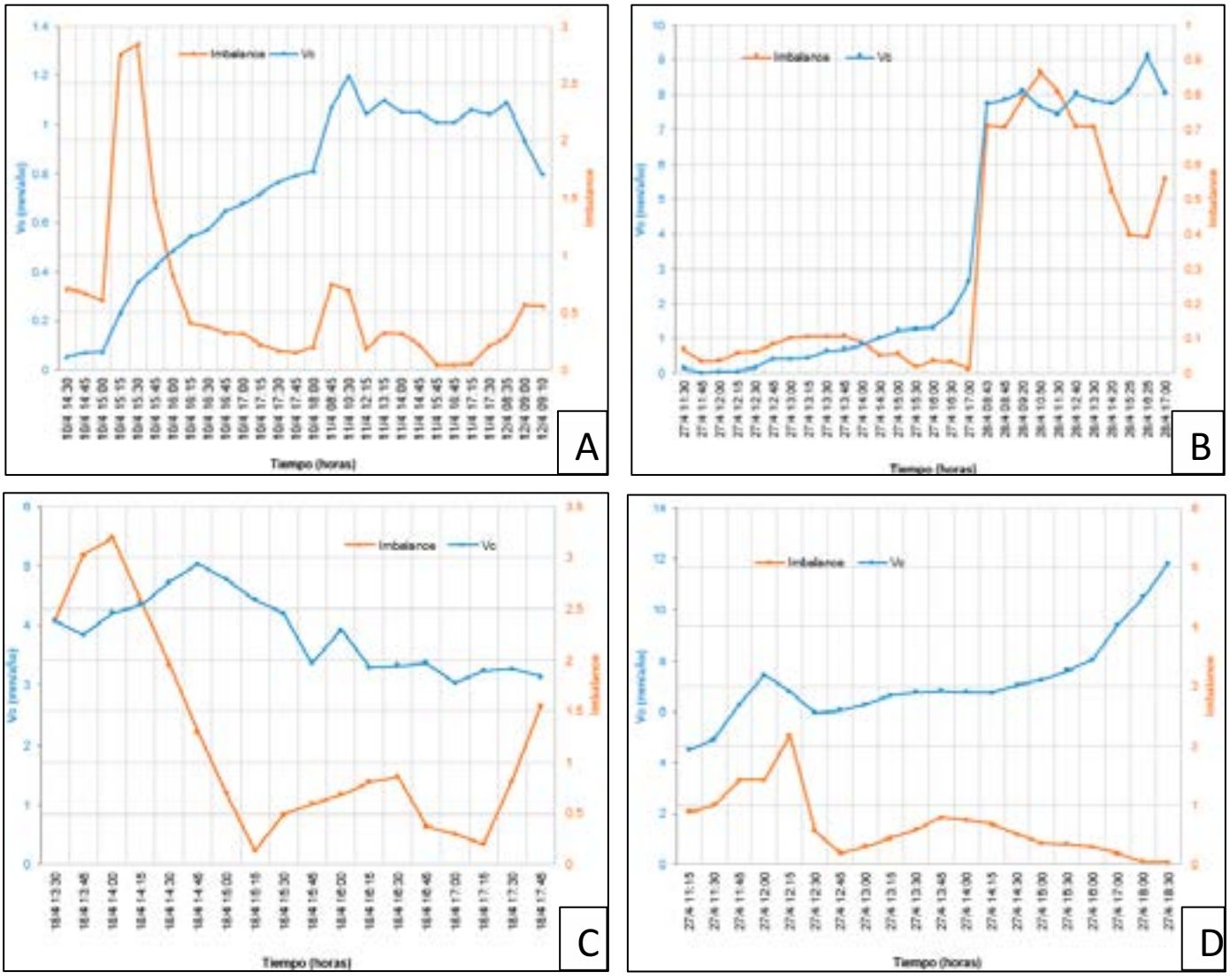


Figura 4. Resultados de Vc y de imbalance medidos mediante corrosómetro. A) Inh PC-8; B) Inh LW-4; C) Inh PE-1; D) LE-6.

Los estudios electroquímicos en el MSR evalúan la capacidad de adhesión del inhibidor a la superficie metálica. La eficiencia a la corrosión está definida como eficiencia a la corrosión general, en presencia de ataque localizado (picado) no es factible dar valores de eficiencia, ya que esta es nula. Es por eso por lo que el criterio de selección de los inhibidores para ser ensayados en el loop de corrosión fue eligiendo los que presentaron las condiciones menos severas de picado o aquellos que no lo presentaban.

El loop de corrosión representa la condición experimental más real para evaluar la performance de los inhibidores. En él se evidencian los problemas de corrosión, erosión,

abrasión, fluidos bifásicos, etc. Al transportar un líquido con alto porcentaje de agua por las cañerías y que contenga CO_2 y/o H_2S, se tiene que parte de ese gas estará en solución y parte circulará como gas húmedo. A ello se lo llama fluido bifásico, que genera un fenómeno corrosivo diferente en la parte superior con respecto a la parte inferior de la cañería.

Los valores de Vc son diferentes en ambos métodos experimentales realizados y ello se debe a los fenómenos de fluidodinámica que están en juego en cada uno de ellos. El método electroquímico con cilindro rotatorio se utiliza como un pre screening, es decir, se selecciona el inhibidor que más capacidad adhesiva tiene frente a fuerzas de corte y/o fuerzas centrífugas y, posteriormente, se realiza el ensayo en loop de corrosión que define cual inhibidor es el más adecuado para proteger al material en las condiciones operativas de campo y el tiempo durante el cual el inhibidor actúa protegiendo al material de la corrosión general y localizada, hasta el momento en que se desactiva.

En el loop de corrosión, para una concentración de 150 ppm de inhibidor y una temperatura de trabajo T= 65 °C, con burbujeo de CO_2, en la solución NACE, se encontró que el inhibidor soluble LW-4, protege al material durante 2.5 horas. Luego de ese tiempo se desactiva aumentando la corrosión general y produciéndose picado. De acuerdo a los criterios de Fontana (Fontana et al., 1978), el inhibidor LW-4 se considera de una “excelente” performance en los primeros 30 minutos ya que presenta una Vc < 0,1 mm/año. Pasados los tiempos indicados, el inhibidor de corrosión se desactiva produciendo en las probetas corrosión generalizada y localizada.

Conclusiones

De los inhibidores solubles, se recomienda el uso de Inh LW-4 por su excelente performance mostrado tanto en el MSR como en el Loop de Corrosión.

No se recomienda usar los inhibidores de corrosión solubles y espumantes por su mala performance en las condiciones utilizadas.

Bibliografía

- R. Nyborg, 2010: Modelos de corrosión por CO_2 para sistemas de producción de petróleo y gas Corrosión, 10.371 (2,01 mil), pp. 1 – 20
- Koteeswaran, 2010: Corrosión por CO_2 y H_2S en oleoductos Universidad de Stavenger (2010), pág. 79
- Garsanyetal., Y. Garsany, D. Pletcher, B. Hedges 2002: El papel del acetato en la corrosión por CO_2 del acero al carbono Corrosión, 2273 (2002), pp. 1 – 16
- Fontana, M. G. and N. D. Greene. Corrosion Engineering. Mc. Graw Hill, 1978.