

Número: 23

Redalyc 3.0

ESCI Web of science

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

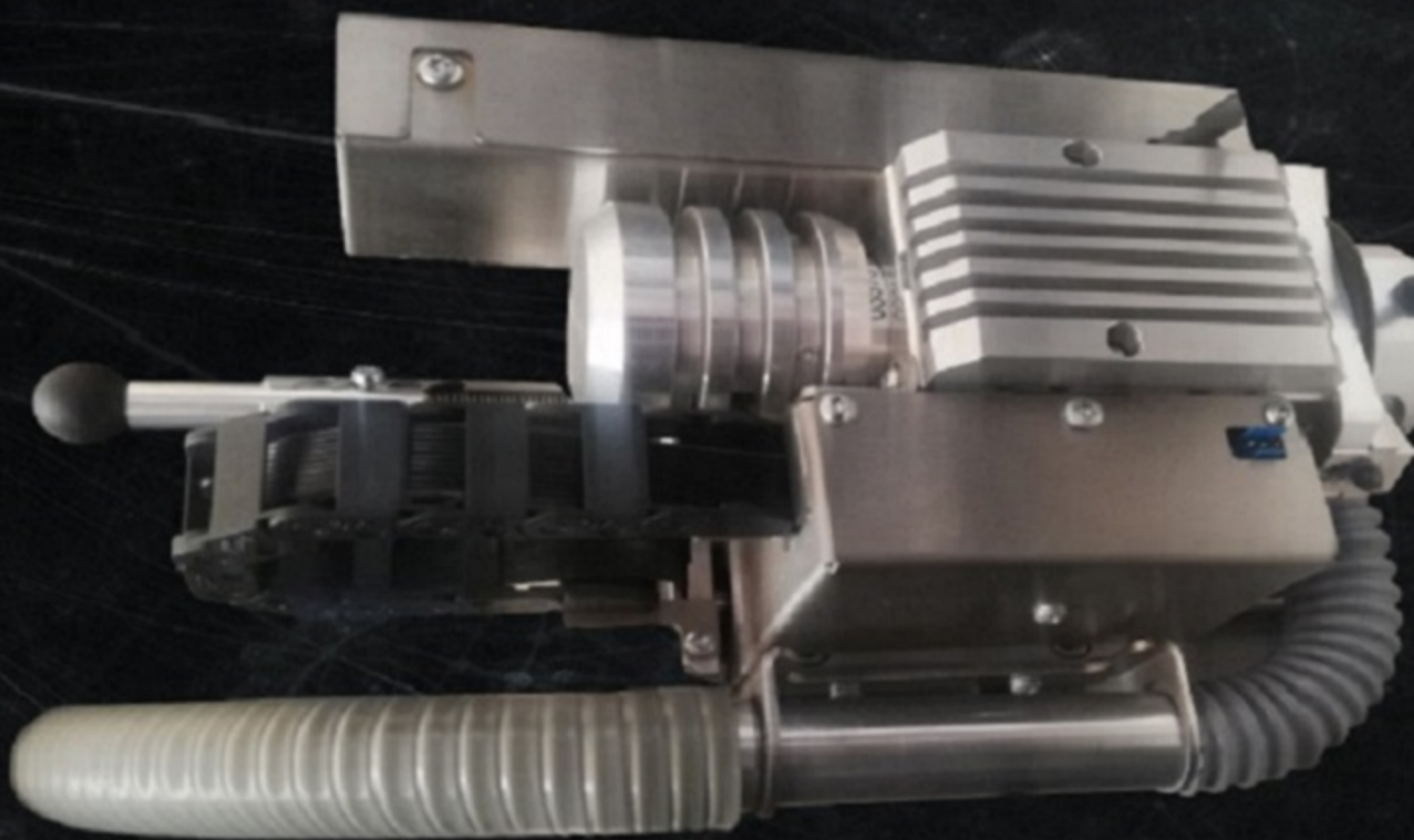
pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

enero/junio 2020

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi

Pag. 9

- Estudio paramétrico para optimización de un generador de hielo tubular de laboratorio

Pag. 86

- Número de coeficientes del filtro de las subportadoras en el Sistema GFDM: efecto en el desempeño

Pag. 53

- Filtraje robusto de señales débiles de fenómenos reales

Pag. 109

INGENIUS

INGENIUS • Número 23 • enero/junio 2020. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Industrial.

Consejo de Editores

RAFAEL ANTONIO BALART GIMENO, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España – Editor Jefe.

JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Jefe.

MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSC, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Adjunto.

Consejo Científico

JUAN LÓPEZ MARTÍNEZ, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España.

ELENA FORTUNATI, PhD, Universidad de Perugia, Italia.

GUSTAVO ROVELO RUIZ, PhD, Hasselt University, Diepenbeek, Bélgica.

FRANKLIN GAVILANEZ ALVAREZ, PhD, American University, Estados Unidos.

PIEDAD GAÑAN ROJO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

JOSÉ ALEX RESTREPO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

SERGIO LUJAN MORA, PhD, Universidad de Alicante, España.

MARTHA ZEQUERA DÍAZ, PhD, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

GROVER ZURITA, PhD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILBERT AGUILAR, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO PARRA ROSERO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JACK BRAVO TORRES, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WALTER OROZCO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO CÉSAR VIOLA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

SERGIO GAMBOA SÁNCHEZ, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ROGER ABDÓN BUSTAMANTE PLAZA, PhD, Universidad de Chile, Chile.

CHRISTIAN BLUM, PhD, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

SILVIA NOEMI SCHIAFFINO, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

ANALÍA ADRIANA AMANDI, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

RUBÉN DE JESÚS MEDINA MOLINA, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

JOHNNY JOSUÉ BULLÓN TORREALBA, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

RODRIGO PALMA HILLERNS, PhD, Universidad de Chile, Chile.

GERARDO ESPINOZA PÉREZ, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ALEXANDRE MENDES ABRÃO, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

KAMLA ABDEL RADI ISMAIL, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ARNALDO DA SILVA, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ÁLVARO ROCHA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ ANTENOR POMILIO, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

LUIS PAULO REIS, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

LUÍS FERNANDES, PhD, Escuela Superior Náutica Infante d. Henrique, Portugal.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JORGE SÁ SILVA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

PEDRO MANUEL SOARES MOURA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

SÉRGIO MANUEL RODRIGUES LOPES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

RICARDO MADEIRA SOARES BRANCO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CARLOS ALEXANDRE BENTO CAPELA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

FILIPPE ARAUJO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS MANUEL GUERRA SILVA ROSA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

HÉLDER DE JESUS FERNANDES, PUGA, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

FILIPPE SAMUEL, PEREIRA DA SILVA, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

CÉSAR SEQUEIRA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PhD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PhD, Universidad de Piura, Perú.

LORENZO LEIJA SALAS, PhD, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

VALERI KONTOROVICH MAZOVER, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALEJANDRO ÁVILA GARCÍA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

PAOLO BELLAVISTA, PhD, Universidad de Bologna, Italia.

CARLOS RUBIO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

FERNANDO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

EMILIO MUÑOZ SANDOVAL, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

YASUHIRO MATSUMOTO KUWABARA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

DAVID ZUMOFFEN, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

VICENTE RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

ALEJANDRO RODRÍGUEZ ÁNGELES, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALISTAIR BORTHWICK, PhD, Universidad de Edimburgo, Reino Unido.

Copyright. INGENIUS 2019, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

Consejo de Revisores

FEDERICO DOMINGUEZ, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

ENRIQUE CARRERA, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ANDRÉS TELLO, MSC, Universidad de Cuenca, Ecuador.

CRISTIAN GARCÍA BAUZA, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

OSVALDO AÑÓ, PhD, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

THALÍA SAN ANTONIO, PhD, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

VICTOR SAQUICELA, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

GONZALO OLMEDO, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ROMÁN LARA, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

GUILLERMO SORIANO, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

MARÍA FERNANDA GRANDA, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

RICARDO CAYSSIALS, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

LEONARDO SOLAQUE GUZMAN, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

JOSÉ DI PAOLO, PhD, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

ASTRID RUBIANO FONSECA, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ROBINSON JIMÉNEZ, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ALFONSO ZOZAYA, PhD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

MAURICIO MAULEDOUX, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

LUIS MEDINA, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ERNESTO CUADROS-VARGAS, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

SAMUEL SEPÚLVEDA CUEVAS, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

CARLOS CARES, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

RAFAEL SOTELO, PhD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

OMAR LOPEZ, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

JOB FLORES-GODOY, PhD, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

LUIS MARIO MATEUS, PhD, Universidad de los Andes, Colombia.

AMADEO ARGÜELLES CRUZ, PhD, Instituto Politécnico Nacional, México.

SANTIAGO BENTANCOURT PARRA, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

GERMÁN ZAPATA, PhD, Universidad Nacio-

nal de Colombia, Colombia.

PEDRO GARCÍA, PhD, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ERNESTO VÁZQUEZ MARTÍNEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

MIGUEL DÍAZ RODRIGUEZ, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

EFRAÍN ALCORTA GARCÍA, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

LUIS CHIRINOS GARCIA, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

OSCAR AVILÉS, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

DORA MARTÍNEZ DELGADO, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

DAVID OJEDA, PhD, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

IRENE BEATRÍZ STEINMANN, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

CORNELIO POSADAS CASTILLO, PhD, Universidad Autónoma Nuevo León, México.

MARIO ALBERTO RIOS MESIAS, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

YUDITH CARDINALE VILLARREAL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

EDUARDO MATAILLANAS, PhD, Universidad Politécnica de Madrid, España.

JOSE EDUARDO OCHOA LUNA, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

DANTE ANGEL ELIAS GIORDANO, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

MANUEL PELAEZ SAMANIEGO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

JUAN ESPINOZA ABAD, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

PIETRO CODARA, PhD, Universidad de Milán, Italia.

ALBERTO SORIA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

JOSÉ M. ALLER, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNEY AMAYA F., PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

SANTIAGO ARANGO ARAMBURO, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

DIEGO ARCOS-AVILÉS, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO AREVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ROBERTO BELTRAN, MSC, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LEONARDO BETANCUR, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

ROBERTO GAMBOA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

PAULO LOPES DOS SANTOS, PhD, Universidad do Porto, Portugal.

PEDRO ANDRÉ DIAS PRATES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ MANUEL TORRES FARINHA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CELSE DE ALMEIDA, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RAMON MOLINA VALLE, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

CRISTINA NADER VASCONCELOS, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JOÃO M. FERREIRA CALADO, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

GUILHERME LUZ TORTORELLA, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

MAURO E. BENEDET, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

ARTEMIS MARTI CESCHIN, PhD, Universidade de Brasília, Brasil.

GILMAR BARRETO, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RICARDO EMILIO F. QUEVEDO NOGUEIRA, PhD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

WESLEY LUIZ DA SILVA ASSIS, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

ANA P. MARTINAZZO, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JORGE BERNARDINO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS GERALDO PEDROSO MELONI, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

FREDDY VILLAO QUEZADA, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

JOSE MANRIQUE SILUPU, MSC, Universidad de Piura, Perú.

GERMÁN ARIEL SALAZAR, PhD, Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, Argentina.

JOSÉ MAHOMAR JANANÍAS, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JORGE ANDRÉS URIBE, MSC, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

RICARDO BELTRAN, PhD, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

ADI CORRALES, MSC, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

JORGE URIBE CALDERÓN, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México

JOSÉ TRINIDAD HOLGUÍN MOMACA, MSc, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

JUAN MANUEL ALVARADO OROZCO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JAVIER MURILLO, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

LUCAS DANIEL TERISSI, PhD, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

RENE VINICIO SANCHEZ LOJA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FREDDY LEONARDO BUENO PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CABRERA MENDIETA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDWUIN JESUS CARRASQUERO, PhD, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

CARLOS MAURICIO CARRILLO ROSETO, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO CARRION GALARZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARMEN CELI SANCHEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CHACON TROYA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL CHASI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN CHICA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO MARCELO CORDERO GUZMÁN, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

LUIS JAVIER CRUZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABRICIO ESTEBAN ESPINOZA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE FAJARDO SEMINARIO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA FERNANDEZ MORALES, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

MARCELO FLORES VAZQUEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JOHN MORALES GARCÍA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS FLORES VÁZQUEZ, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

CARLOS FRANCO CARDONA, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

CRISTIAN GARCÍA GARCÍA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

TEONILA GARCÍA ZAPATA, PhD, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

LUIS GARZÓN MÑOZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NATALIA GONZALEZ ALVAREZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ERNESTO GRANADO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ADRIANA DEL PILAR GUAMAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN INGA ORTEGA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ESTEBAN INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAOLA INGAVÉLEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CESAR ISAZA ROLDAN, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

NELSON JARA COBOS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RUBEN JERVES, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

VICTOR RAMON LEAL, PhD, Investigador de PDVSA, Venezuela.

GABRIEL LEON, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDILBERTO LLANES, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

LUIS LÓPEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS MAFLA YÉPEZ, MSc, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

HADER MARTÍNEZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

JAVIER MARTÍNEZ, PhD, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

ALEX MAYORGA, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

JIMMY MOLINA, MSc, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

VICENTE MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

FABIÁN MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO MORALES, MSc, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador.

YOANDRYS MORALES TAMAYO, PhD, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi.

OLENA LEONIDIVNA NAIDIUK, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

HERNÁN NAVAS OLMEDO, MSc, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

CESAR NIETO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABIO OBANDO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

LUIS ORTIZ FERNANDEZ, MSc, Universidade Federal de Rio Grande del Norte, Brasil.

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAULO PEÑA TORO, PhD, Ministerio de Productividad, Ecuador.

PATSY PRIETO VELEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO QUINDE FALCONI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIANA QUINTANA ESPINOZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILLIAM QUITIAQUEZ SARZOSA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FLAVIO QUIZHPI PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WASHINGTON RAMIREZ MONTALVAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FRAN REINOSO AVECILLAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NÉSTOR RIVERA CAMPOVERDE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE ROMERO CONTRERAS, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela.

FABIAN SAENZ ENDERICA, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LUISA SALAZAR GIL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

GUSTAVO SALGADO ENRÍQUEZ, MSc, Universidad Central del Ecuador., Ecuador.

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo.

JONNATHAN SANTOS BENÍTEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ANDRÉS SARMIENTO CAJAMARCA, MSc, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

LUIS SERPA ANDRADE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CRISTIAN TIMBI SISALIMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MILTON TIPAN SIMBAÑA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL TORRES JARA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RODRIGO TUFÍÑO CÁRDENAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNANDO URGILES ORTÍZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN VALLADOLID QUITOISACA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EFREN VÁZQUEZ SILVA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO VERDUGO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARY VERGARA PAREDES, PhD, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

JENNIFER YEPEZ ALULEMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO ZAMBRANO ABAD, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA ZAPATA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de publicaciones

JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PhD
JUAN BOTASSO BOETI, SDB, PhD (†)
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, PhD
LUIS ÁLVAREZ RODAS, PhD
JOHN CALLE SIGÜENCIA, PhD
JORGE CUEVA ESTRADA, MSc
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PhD
JAIME PADILLA VERDUGO, MSc
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PhD
SHEILA SERRANO VINCENTI, MSc
PEDRO RODRÍGUEZ LÓPEZ, MSc
RENÉ UNDA LARA, MSc
BETTY RODAS SOTO, MSc
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSc

Editor General

LUIS ÁLVAREZ-RODAS, PhD

Consejo Técnico

DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSc, Diagramación y Maquetación
ANDRÉS LÓPEZ JARAMILLO
LCDA. SOLEDAD AGUILAR LOJA
ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PhD

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)
PAULINA TORRES (Edición)
RAYSA ANDRADE (Maquetación)
MARTHA VINUEZA (Maquetación)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador),
Avenida 12 de octubre N422 y Wilson,
Bloque A, UPS Quito, Ecuador.
Casilla 17-12-719 Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Traductor

ADRIANA CUIEL

Tiraje: 800 ejemplares

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 23, enero – junio 2020

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico



Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)



El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*



Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.



Los artículos de la presente edición pueden consultarse en
<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

La Revista INGENIUS está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASE DE DATOS SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Javier Herrán Gómez, sdb
Rector

©Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:
Secretaría Técnica de Comunicación
Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec
Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,
publicación semestral, N.º 23, enero/junio 2020
John Calle Sigüencia, PhD, Editor Jefe
revistaingenius@ups.edu.ec

Impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.
Teléfono: (+593 7) 283 17 45
Cuenca – Ecuador
Correo electrónico: centrograficosalesiano@lms.com.ec

Estimadas y estimados lectores:

Al iniciar el año 2020 INGENIUS ha realizado un balance de las publicaciones de los últimos tres años y los resultados dan a conocer la excelente aceptación que la revista ha generado a nivel de la comunidad científica internacional.

Desde enero del 2017 hasta la fecha se ha dado soporte a artículos científicos de doce países: Brasil, Chile, México, Perú, Venezuela, Cuba, Colombia, Argentina, España, Panamá, Estados Unidos y Ecuador; en estos países se ha generado la participación de 47 universidades entre las que se encuentran la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, la Universidad Estadual Paulista, la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, la Universidad Tecnológica Nacional de Santa Fe, la Universidad Tecnológica de Panamá, la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima, el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey ITESM, la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco de Ciudad de México, La Universidad de Concepción, la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad Politécnica de Madrid, la Escuela Politécnica Nacional EPN, la Escuela Politécnica del Litoral ESPOL, la Universidad de Cuenca, la Universidad Técnica de Cotopaxi, la Escuela Politécnica del Chimborazo ESPOCH, la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y otras más que a través de 120 estamentos entre los que se consideran grupos de investigación, facultades, escuelas, carreras, departamentos, institutos de posgrado, han publicado hasta el número anterior sesenta artículos científicos, los mismos que han sido citados alrededor de cuatrocientas veces por investigadores a nivel mundial en publicaciones de revistas indexadas en bases de datos de gran

renombre como Scopus, SciELO, Redalyc, Latindex, Redib, Dialnet y otras más.

Ratificando lo antes expuesto en el presente número se publican contribuciones de gran interés como es el caso de un Control de velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes accionado por un inversor trifásico multinivel, desarrollado por Barahona, Abad y Linares que pertenecen a la Universidad Tecnológica de la Mixteca – México, también podemos encontrar el aporte de Lascano, Valcárcel, Balart y otros que pertenecen a la Universidad Politécnica de Valencia – España que presentan su investigación sobre la Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío; otro aporte de gran interés es el presentado por Kontorovich desde el Instituto Politécnico Nacional de México que realiza una propuesta para el Filtraje robusto de señales débiles de fenómenos reales.

Algo importante a resaltar es el incremento de investigadoras mujeres en el ámbito de la Ingeniería, ejemplo de ello es trabajo presentado por Hernández y Suárez, dos investigadoras del área de metalurgia que pertenecen a la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre y a la Universidad Central de Venezuela respectivamente, quienes dan a conocer su investigación referente al Efecto de la composición química del baño en la microestructura y resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente.

Los datos obtenidos fortalecen el trabajo del equipo editorial de la revista INGENIUS y ratifican el compromiso de servicio a la comunidad científica internacional.

John Calle Sigüencia, PhD

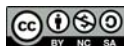
EDITOR JEFE

ÍNDICE

Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi.	9
Experimental and numerical study of the pressure of the water flow in a venturi tube	
San Luis B. Tolentino Masgo	
Análisis del comportamiento de las emisiones de CO₂, CO y del factor lambda de un vehículo con sistema de inyección convencional con catalizador y sin catalizador	23
Analysis of behavior of CO ₂ emissions, CO and the lambda factor of a vehicle with a conventional injection system with catalyst and without catalyst	
Edgar Vicente Rojas Reinoso, Vicente Javier Romero Hidalgo, Johnny Marcelo Pancha Ramos	
Predicción de emisiones de CO y HC en motores Otto mediante redes neuronales. . . .	30
Prediction of CO and HC emissions in Otto motors through neural networks	
Rogelio Santiago León Japa, José Luis Maldonado Ortega, Wilmer Rafael Contreras Urgilés	
Efecto de la composición química del baño en la microestructura y resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente: Una revisión	40
Effect of Chemical Bath Composition on Microstructure and Corrosion Resistance of Zinc Coatings by Hot Dip: A Review	
Jeanette Hernández, Maribel Suárez	
Número de coeficientes del filtro de las subportadoras en el Sistema GFDM: efecto en el desempeño.	53
Number of subcarrier filter coefficients in GFDM system: effect on performance	
Randy Verdecia Peña, Humberto Millán Vega	
Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío	62
Manufacturing of composite materials with high environmental efficiency using epoxy resin of renewable origin and permeable light cores for vacuum-assisted infusion molding	
Diego Lascano, Jorge Valcárcel, Rafael Balart, Luís Quiles-Carrillo, Teodomiro Boronat	
Estimador de canal basado en sensado compresivo y LDPC para OFDM usando SDR	74
Compressive Sensing Based Channel Estimator and LDPC Theory for OFDM using SDR	
Anthony Yanza-Verdugo, Christian Pucha-Cabrera, Juan Inga-Ortega	
Estudio paramétrico para optimización de un generador de hielo tubular de laboratorio	86
Parametric Study for Optimization of the Ice Tube Generator of Laboratory	
Rocío Guapulema-Maygualema, Víctor Hidalgo-Díaz	
Control de velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes accionado por un inversor trifásico multinivel	97
Speed control of a permanent magnet synchronous motor actuated by a three-phase multi level inverter	
Rosalino Mayoral Lagunes, José Antonio Juárez Abad, Beatriz Angélica Aguilar López, Jesús Linares Flores, Jorge Luis Barahona Ávalos	
Filtraje robusto de señales débiles de fenómenos reales	109
Robust filtering of weak signals from real phenomena	
Valeri Kontorovich, Fernando Ramos-Alarcón	
Normas editoriales	120
Guidelines	

FE DE ERRATAS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.



ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA PRESIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN UN TUBO VENTURI

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE PRESSURE OF THE WATER FLOW IN A VENTURI TUBE

San Luis B. Tolentino Masgo^{1,2}

Resumen

El tubo Venturi es un dispositivo utilizado para medir el caudal en diferentes procesos de la industria. En el presente trabajo, se realiza un estudio para dos casos, uno experimental y otro numérico de la presión ejercida por el flujo de agua en las paredes de un tubo Venturi. En el primer caso, se realizan cinco experimentos con diferentes caudales. En el segundo, el flujo se simula para dos tipos de mallas y dos modelos de turbulencia, utilizando el código COMSOL Multiphysics 4.3. Los resultados experimentales y numéricos mostraron que las presiones del flujo sobre las paredes en dos referencias identificadas C y G mantienen constante su magnitud; además, los perfiles numéricos mostraron que la menor caída de presión se presenta en la pared a la entrada y salida de la sección de la garganta. Se concluye que, la distribución de la presión del flujo en la pared de la sección de la garganta tiene un perfil convexo, y los resultados de presiones obtenidos para el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar, se ajustan más a los datos experimentales.

Palabras clave: flujo de agua, modelo de turbulencia, presión, simulación, tubo Venturi.

Abstract

The Venturi tube is a device used to measure the flow rate in different industrial processes. In the present work, a study is carried out for two cases, one experimental and another numerical of the pressure exerted by the flow of water on the walls of a Venturi tube. In the first case, five experiments with different flow rates are carried out. In the second, the flow is simulated for two types of meshes and two turbulence models, using the code COMSOL Multiphysics 4.3. The experimental and numerical results showed that the pressures of the flow on the walls in two references identified as C and G keep their magnitude constant; in addition, the numerical profiles showed that the lowest pressure drop occurs in the wall at the inlet and outlet of the throat section. It is concluded that, the distribution of the flow pressure in the wall of the throat section has a convex profile, and the results of pressures obtained for the standard $k-\epsilon$ turbulence model are more adjusted to the experimental data.

Keywords: Water flow, Turbulence model, Pressure, Simulation, Venturi tube.

^{1,*}Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela.

²Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Autor para correspondencia ✉: sanluist@gmail.com 🌐 <http://orcid.org/0000-0001-6320-6864>

Recibido: 28-06-2019, aprobado tras revisión: 29-10-2019

Forma sugerida de citación: Tolentino Masgo, San Luis B. (2020). «Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 9-22. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.01>.

1. Introducción

En el campo de la ingeniería, los instrumentos que miden el caudal de un fluido están clasificados en dos clases, los instrumentos mecánicos y los instrumentos de pérdida de carga [1, 2], y se detallan en el texto de la ASME [3]. Entre estos se encuentra el tubo Venturi, como instrumento de pérdida de carga por contracción de vena, el cual fue inventado por Clemens Herschel (1842-1930) [4], y nombrado así en honor de Giovanni Battista Venturi (1746-1822) por sus trabajos pioneros acerca del flujo en secciones cónicas [2].

Los flujos en tales instrumentos, en su mayoría, son turbulentos, y se caracterizan por tener fluctuaciones aleatorias y rápidas de remolinos, los cuales transportan masa, energía, cantidad de movimiento a otras regiones del flujo, donde las fluctuaciones adicionales transfieren de movimiento y de energía, además, están relacionados con valores altos de coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa [1, 2].

Mediante el número adimensional de Reynolds [5, 6] se determina si el flujo es laminar o turbulento, donde el número de Reynolds es el parámetro que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en un fluido, siendo la fuerza de inercia el producto de la velocidad promedio y del diámetro interno, y de la fuerza viscosa la viscosidad cinemática. El flujo laminar es considerado para el número de Reynolds con valores menores de 2300, en el rango del número de Reynolds de 2300-4000 el flujo es considerado en transición, y para el número de Reynolds mayores de 4000 el flujo es turbulento, y se tiene una representación gráfica conocido como el diagrama de Moody [1, 2]. Otros estudios realizados sobre superficies acondicionadas reportan que el número de Reynolds tiene valores distintos para flujo laminar y turbulento.

Para reproducir el comportamiento del flujo mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD, por su sigla en inglés) [7], se requiere de datos experimentales para su calibración y validación, tales como: la presión, la temperatura, la velocidad, que son parámetros que se pueden medir en laboratorio o en espacios abiertos. Además, la CFD requiere del empleo de un modelo de turbulencia que resuelve el problema de cierre en las ecuaciones promediadas de las ecuaciones generales de Navier-Stokes. De la diversidad de los modelos de turbulencia para el flujo de fluidos, se debe seleccionar los perfiles de las soluciones numéricas que se ajusten más a los resultados experimentales. Una vez evaluado el modelo de turbulencia, es posible continuar el desarrollo de las simulaciones computacionales deseadas para determinar el comportamiento del campo de flujo bajo ciertas consideraciones, sea para un flujo interno o externo. Cabe señalar que, en ciertas regiones críticas, los resultados numéricos evaluados con diferentes modelos de turbulencia [8] son

distintos, y en regiones menos críticas los resultados son similares, debido a la capa límite y de la interacción de la separación de flujo [9, 10].

Una investigación experimental fue realizada por Lindley [11] para el tránsito del flujo en un tubo Venturi clásico, donde al inicio de la sección de la garganta, el flujo de agua presentó caídas de presión en una sección de la pared. Posteriormente, para la misma geometría, Sattery y Reader [12] simularon el flujo mediante la CFD, donde en la sección de la garganta los perfiles numéricos mostraron caídas de presión. Un resultado similar de la caída de presión también fue obtenido por Tamhakar *et al.* [13], aplicando la CFD, para un tubo Venturi de dimensiones diferente. Por lo cual, se ha motivado en continuar con la investigación de la presión del flujo en medidores Venturi.

En el presente trabajo se realiza un estudio experimental y numérico de la presión que ejerce el flujo de agua en las paredes de un tubo Venturi. En el caso experimental se realiza el estudio para cinco experimentos con caudales diferentes, en el caso numérico se realiza el estudio para dos modelos de turbulencia: $k-\epsilon$ estándar de Launder y Spalding [14] y $k-\omega$ estándar de Wilcox [15], y para dos dominios discretizados por el método de elementos finitos (MEF), una con celdas cuadriláteras y otra con celdas triangulares, con el fin de determinar en qué regiones del flujo se producen las caídas mínimas de la presión. Asimismo, validar los dos modelos de turbulencia empleados con los datos experimentales de presión. Cabe señalar, las presiones experimentales son medidas en puntos específicos que están separados entre sí por una distancia establecida a lo largo de la pared del tubo Venturi, y no aporta información de presiones en secciones críticas; mientras que, los perfiles numéricos son trayectorias continuas y aportan mayor información de la presión a lo largo de toda la pared.

Se presenta el fundamento matemático, se exponen los procedimientos y los resultados de los experimentos y de las simulaciones numéricas. Posteriormente, se presentan las conclusiones del análisis realizado.

2. Materiales y métodos

2.1. Instalación experimental

El tubo Venturi sometido a estudio en el presente trabajo se muestra en la Figura 1. Es un dispositivo fabricado por la empresa TecQuipment, el cual se utiliza en ensayos experimentales para determinar el caudal de agua por diferencia de presión. El equipo experimental se encuentra instalado en el laboratorio de la Sección de Termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela. El tubo Venturi consta de cinco secciones: una sección recta, una sección conver-

gente, una sección recta la cual es la garganta, una sección divergente, y otra sección recta. En la imagen, se muestran un total de once mangueras plásticas que son llamadas tubos piezométricos, las cuales sirven para medir las lecturas de alturas piezométricas de las columnas de agua, y están conectados al tubo Venturi y al colector (*manifold*) de vidrio. En la salida del tubo Venturi está ubicada la válvula de control y, en el extremo derecho del colector la válvula de purga. Antes del tubo Venturi está ubicada la válvula de regulación de caudal y esta se encuentra después de la bomba, la cual no se muestra en la figura.

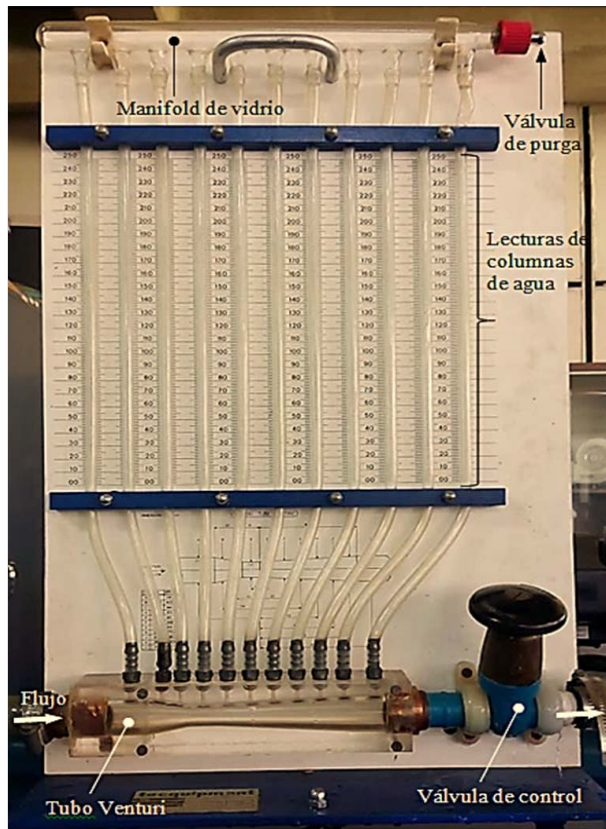


Figura 1. Equipo experimental tubo Venturi. Las lecturas de las columnas de agua se miden en milímetros.

La geometría 3D y la proyección en el plano del tubo Venturi se ilustran en la Figura 2, donde se muestran las ubicaciones de las referencias A, B, C, D, E, F, G, H, J, K y L, lugar donde se conectan las once mangueras plásticas. La referencia A está ubicado al inicio de la sección recta; B y C están ubicados en la sección convergente; D en la mitad de la sección recta de la garganta; E, F, G, H, J y K ubicados en la sección divergente; y L está ubicado al final de la sección recta, a la salida del tubo Venturi. El diámetro interno mayor de las dos secciones rectas es 26 mm, el diámetro interno de la garganta 16 mm, siendo la longitud total del tubo Venturi de 156 mm. Los diámetros internos de las secciones transversales y de las

ubicaciones de las referencias se muestran en la Tabla 1.

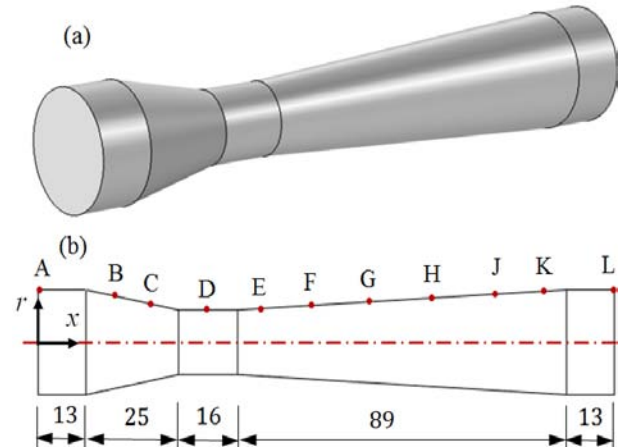


Figura 2. (a) Geometría 3D del tubo Venturi. (b) Ubicación de las referencias y dimensiones de las secciones longitudinales en milímetros.

Tabla 1. Diámetro interno para cada referencia, y distancia axial donde están ubicadas las referencias

Ref.	Diámetro interno (mm)	Distancia axial, eje x (mm)
A	26	0
B	23,2	20
C	18,4	32
D	16	46
E	16,8	61
F	18,47	76
G	20,16	91
H	21,84	106
J	23,53	121
K	25,24	136
L	26	156

El ensayo experimental se realizó mediante los siguientes pasos: inicialmente, se abrieron las dos válvulas al 100 %, la válvula de regulación de caudal y de control de caudal. Una vez que la bomba del banco de prueba estuvo en funcionamiento, la válvula de control se cerró 100 %, se permitió que saliera el aire atrapado en las mangueras y en el colector a través de la válvula de purga y quedando totalmente llena de agua; seguidamente, la válvula de regulación se cerró 100 %. Luego, se abrió la válvula de control 100 %, y por la válvula de purga se permitió el ingreso de aire proveniente de la atmósfera local, para permitir que se formaran las columnas de agua a la altura establecida de 140 mm como posición inicial, todas al mismo nivel, para las once mangueras. La toma de lectura de 140 mm quedó dentro del rango de 0,0–200 mm del

panel, tal como se muestra en la Figura 3. Seguidamente, incrementando la abertura de la válvula de regulación se realizaron cinco ensayos experimentales para la toma visual de lecturas piezométricas, para el rango de caudal de $2,244 \times 10^{-4} - 3,7 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}$.

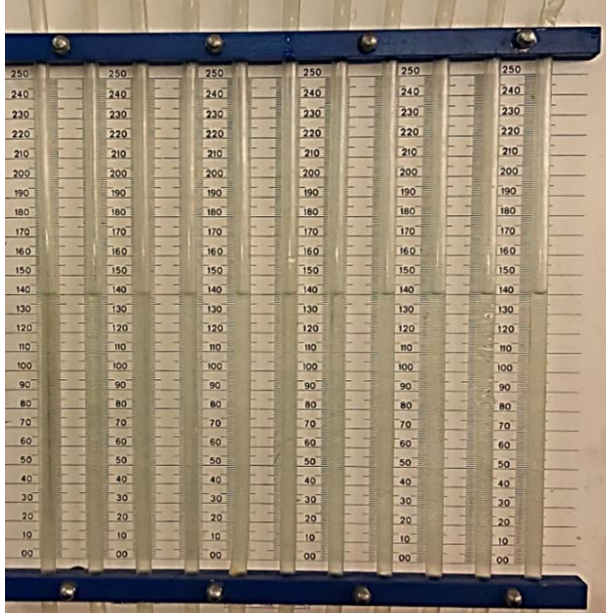


Figura 3. Posición inicial de las alturas piezométricas de 140 mm de los niveles de las once columnas de agua. Donde, de izquierda a derecha, el primer tubo piezométrico está conectado en la referencia A de la pared del tubo Venturi, el segundo en la referencia B, así mismo, están ubicados los otros hasta la referencia L (ver Figura 2).

2.2. Simulación numérica

2.2.1. Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones gobernantes aplicadas a la CFD, para un flujo incompresible, en condiciones estacionarias, y simuladas para un dominio computacional 2D con simetría axial, en su forma diferencial se expresan como:

Ecuación de la conservación de la masa.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de la conservación de cantidad de movimiento lineal, en la dirección axial.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (2)$$

En la dirección radial.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + F_r \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo $\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$

Donde, los parámetros son: la densidad ρ , la velocidad axial v_x y velocidad radial v_r , el radio r , la viscosidad μ , los gradientes de presión $\frac{\partial P}{\partial x}$ y $\frac{\partial P}{\partial r}$, y las fuerzas en la dirección axial F_x y radial F_r .

El modelo de turbulencia va acoplado a la ecuación de cantidad de movimiento lineal, y son ecuaciones de transporte semiempíricas que modelan el mezclado y difusión que se incrementa a causa de remolinos turbulentos, y son resueltas por la ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (RANS, por sus siglas en inglés) [16]. Las primeras investigaciones de la turbulencia fueron desarrolladas por Kolmogorov (1941) basándose en los resultados de Reynolds (1883). Cabe señalar, para la simulación del flujo en el presente trabajo, se emplean los modelos de turbulencia $k - \epsilon$ estándar de Launder y Spalding [14] y $k - \omega$ estándar de Wilcox [15].

2.2.2. Dominio computacional y mallado

Por la simetría que tiene la geometría del tubo Venturi, se considera el dominio computacional en 2D con simetría axial, la cual se muestra en la Figura 4. Esta simplificación de la geometría de 3D a 2D contribuye en la reducción de la cantidad de celdas de la malla, el tiempo de procesamiento, y el coste computacional del equipo, y es muy común las simplificaciones para sólidos de revolución y geometrías primitivas simétricas. Además, en la misma figura del dominio 2D, se señala donde se aplican las condiciones de borde.

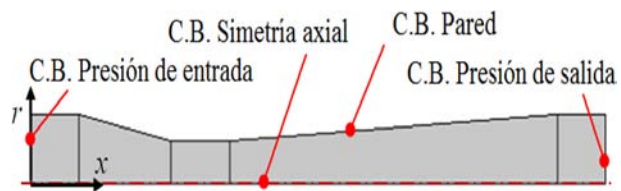


Figura 4. Dominio computacional 2D con simetría axial en el eje x, del tubo Venturi.

La Figura 5 muestra el dominio mallado 2D, donde el dominio fue mallado para dos tipos de celdas, una cuadrilátera y otra triangular. El dominio mallado con celdas cuadriláteras tiene 19 600 elementos y el dominio mallado con celdas triangulares 18 047 elementos. Para ambos casos, la malla fue refinada en las regiones adyacentes a las paredes, debido a la presencia

de esfuerzos cortante en esas regiones del flujo. En la misma figura, se muestra como detalle la sección de la garganta, donde se observa cómo están distribuidas las celdas cuadriláteras y las celdas triangulares.

Como parte de un estudio de convergencia numérica, antes de obtener la malla final que se muestra en la Figura 5, se refinó cinco veces la sección de la garganta hasta obtener una densidad de malla óptima. Dicho refinamiento en la garganta fue por ser una sección crítica por la caída de presión del flujo. En la mitad de la longitud de la garganta, se encuentra ubicado el punto de referencia D (ver Figura 2), allí se obtuvieron los resultados numéricos finales de la presión de 44,79 (mmH₂O) para la malla con celdas cuadriláteras y de 51,38 (mmH₂O) para las celdas triangulares, evaluados con el modelo de turbulencia $k - e$ estándar; y la presión de 48,53 (mmH₂O) para la malla con celdas cuadriláteras y de 55,75 (mmH₂O) para las celdas triangulares, evaluados con el modelo de turbulencia $k - \omega$ estándar; obteniendo para ambos casos errores numéricos de convergencia numérica menores de 0,01 %.

La calidad de la malla se evaluó para celdas bidimensionales, donde para el caso de las celdas cuadriláteras se obtuvo para el tamaño de elemento máximo de 0,0105 mm y elemento mínimo de $4,68 \times 10^{-5}$ mm, curvatura de 0,3, y tasa de crecimiento de 1,3; asimismo, para el caso de las celdas triangulares se obtuvo para el tamaño de elemento máximo de $3,64 \times 10^{-4}$ mm y elemento mínimo de $5,2 \times 10^{-5}$ mm, curvatura de 0,25, y tasa de crecimiento de 1,15, respectivamente. Dando como resultados finales que los dos dominios mallados con celdas cuadriláteras y triangulares son de buena calidad.

Los dominios computacionales fueron discretizados en la plataforma de mallado del código COMSOL Multiphysics versión 4.3, el cual aplica el método de elementos finitos (MEF).

Las condiciones de borde, para las presiones del flujo de agua aplicadas a la entrada (referencia A) y a la salida (referencia L) del tubo Venturi, se muestran en la Tabla 2.

Las paredes del tubo Venturi se consideran adiabáticas. La velocidad del flujo en la dirección radial y axial en las paredes es nula por la presencia de esfuerzos cortante. En la simetría axial en el eje x, la velocidad del flujo en la dirección radial es nula.

En todo el dominio computacional se considera flujo isotérmico, siendo para la temperatura del agua a 24 °C, la densidad 997,1015 kg/m³ y la viscosidad dinámica 0,00091135 Pa.s, donde ambos parámetros físicos son tomados como constantes para la simulación del flujo.

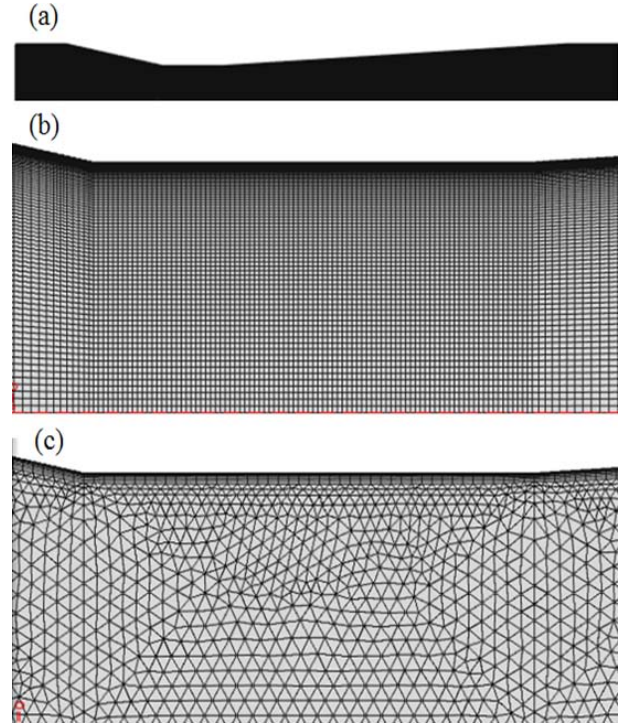


Figura 5. (a) Dominio computacional 2D mallado. Detalle de la sección de la garganta: (b) Malla estructurada con celdas cuadriláteras. (c) Malla con celdas triangulares.

Tabla 2. Condiciones de borde: presión de entrada (referencia A), salida (referencia L)

Exp.	1	2	3	4	5
Columna de agua (mmH ₂ O)					
Ref. A	160	170	179	190	199,5
Ref. L	150	155,5	161	167	173

2.2.3. Método de solución computacional y equipo

Para la simulación del flujo isotérmico, en el código COMSOL Multiphysics, se seleccionó la opción geometría 2D con simetría axial y condiciones de flujo estacionario. Para el flujo turbulento se aplicaron los modelos de turbulencia $k - e$ estándar y $k - \omega$ estándar, tanto para los dominios mallados con celdas cuadriláteras y triangulares. Para la tolerancia relativa se determinó un valor fijo de 0,001. Para la solución, se estableció la iteración máxima hasta 100, y el método de solución PARDISO (de su acrónimo en inglés, parallel sparse direct solver).

Para el procesamiento de datos se utilizó un equipo con las siguientes características: Laptop marca Síragon, modelo M54R, Intel Core 2 Duo, dos procesadores de 1,8 GHz, y memoria RAM de 3 GB.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados experimentales

Los caudales del agua se obtuvieron por el método volumétrico, para cada experimento realizado, y cuyos resultados se muestra en la Tabla 3. Con estos valores de caudales se determinó el número de Reynolds.

Tabla 3. Datos experimentales de caudales

Exp.	1	2	3	4	5
Caudal $\times 10^4$ (m ³ /s)					
	2,244	2,583	2,991	3,382	3,704

En la Tabla 4 se presenta las magnitudes del número de Reynolds obtenidos en la referencia A, L, y D. Donde, en la referencia A, el número de Reynolds tiene la misma magnitud que en la referencia L, esto es porque el tubo Venturi tiene el mismo diámetro. En las referencias A y L, para los cinco experimentos, se obtuvo que el número de Reynolds está en el rango de $12000 < Re < 20000$; en la sección de la garganta, en la referencia D, en el rango de $19500 < Re < 32300$. Por lo cual, se observa que a medida que aumenta el caudal, el número de Reynolds también incrementa su magnitud, y esto es debido a que se incrementan las fuerzas inerciales del fluido.

Tabla 4. Datos experimentales de número de Reynolds

Exp.	1	2	3	4	5
Número de Reynolds					
Ref. A y L	12021	13839	116028	18118	19844
Ref. D	19534	22489	26045	29442	32246

La Tabla 5 muestra los cinco resultados experimentales de alturas piezométricas obtenidos en las referencias A, B, C, D, E, F, G, H, J, K y L, y en la Figura 6 se muestra la gráfica correspondiente de la presión manométrica en (mmH₂O), y la Figura 7 muestra una imagen de las alturas piezométricas de las once columnas de agua correspondiente al experimento 3, y se observa la forma cóncava de los meniscos por efecto de la tensión superficial del agua que se forman en cada columna.

Tomando como referencia de la posición inicial de las once columnas con el nivel de agua a la altura de 140 mm, se observa que, a medida que se incrementa el caudal, el nivel de las columnas del agua en las referencias A y B se incrementan; en la referencia C se mantiene constante; en las referencias D, E y F disminuyen; en la referencia G también se mantiene constante; y, en las referencias H, J, K y L se incrementan. Tomando en cuenta las diferencias de columnas de agua entre A y D, la menor diferencia de presión

se tiene para el experimento 1, y la mayor diferencia de presión para el experimento 5. En la misma Figura 6, se observan las pérdidas de presión del fluido en la referencia L, con respecto a la referencia A. De todos los experimentos realizados el que tiene mayor pérdida de presión es el experimento 5.

Para cada experimento, la caída de presión se presenta en la sección de la garganta, tal como se muestra en la referencia D, donde el flujo es inducido a tener una caída de presión de manera forzada, lo cual es conocido como efecto Venturi, y la menor caída de presión se presenta para el experimento 5.

Tabla 5. Datos experimentales de presión manométrica en cada referencia de la pared del tubo Venturi Temperatura del agua: 24 °C

Exp.	1	2	3	4	5
Ref. Columna de agua (mmH ₂ O)					
A	160	170	179	190	199,5
B	156,5	165	172	181	189
C	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5
D	106	91	76,5	60,5	45
E	109,5	97	85	72	60
F	125	122	119	115,5	112
G	136	136	136	136	136
H	142	144,5	146,5	150	152
J	145,5	149,5	153	158	162
K	148	153	157,5	163,5	168,5
L	150	155,5	161	167	173

De los resultados obtenidos, en las referencias C que tiene un diámetro interno de 18,4 mm y G que tiene un diámetro de 20,16 mm, por más que se incrementa la velocidad del flujo en esas referencias por el aumento del caudal, las presiones no varían su magnitud confluyendo en un solo lugar para cada referencia mencionada. Esto es consecuencia de que la válvula de control mantiene su abertura de 100 % y el flujo se descarga en un reservorio a la presión de la atmósfera local, y a la vez que la presión del aire atrapado en el colector, que es menor a la presión de la atmósfera local, sostiene la formación de las columnas de agua.

Cabe señalar que, si se mantuviera la válvula reguladora con abertura fija, y se manipulara la válvula de control, no habría intercepción en las referencias C y G, ya que los niveles las columnas de agua se desplazarían hacia arriba o hacia abajo por el incremento o disminución de la presión del flujo en todo el sistema del tubo Venturi.

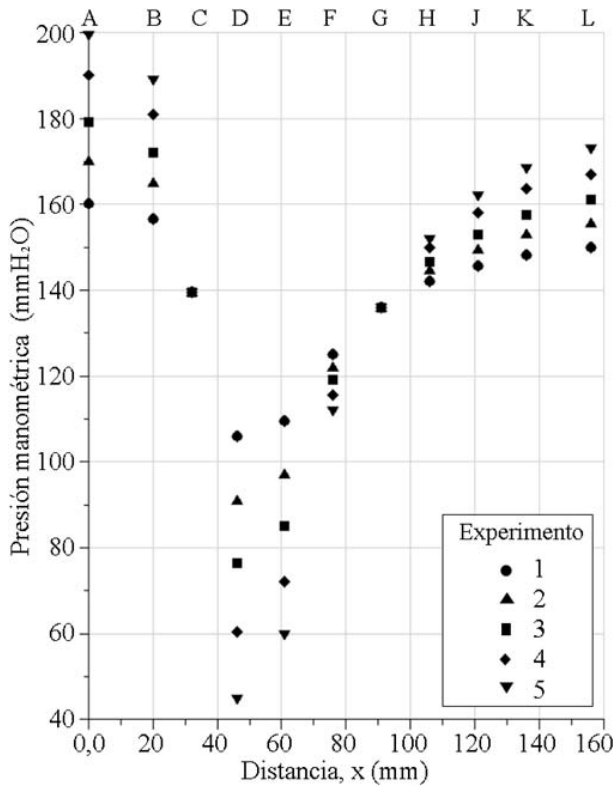


Figura 6. Datos experimentales de lecturas de alturas piezométricas de las columnas de agua tomados en diferentes puntos de referencias de las paredes del tubo Venturi. Temperatura del agua 24 °C.



Figura 7. Alturas piezométricas para diferentes niveles de las columnas de agua, correspondiente al experimento 3.

Por otro lado, si se analiza la pérdida de presión desde la referencia C hasta G, la caída de presión permanece invariable por más que se incremente la energía cinética del fluido en dichas regiones, ya que, como se muestra en la Tabla 5 y graficada en la Figura 6, en la referencia C se tiene una altura piezométrica fija de 139,5 mm y en G de 136,0 mm, donde, la diferencia de presión es de 3,5 (mmH₂O), para los cinco experimentos realizados.

Las diferencias de presión entre las referencias A-D y A-L, se presenta en la Tabla 6, y en la Figura 8

se muestra el comportamiento de ambas rectas mediante la línea de tendencia lineal, para la diferencia de presión de A-D se tienen un valor de coeficiente de determinación $R^2=0,997$, y para la diferencia de presión de A-L un valor de $R^2=0,996$. Ambos resultados muestran que existe una proporcionalidad de diferencia de presión con respecto al caudal.

Tabla 6. Diferencia de presión entre la referencia A y D, y la referencia A y L, para cada experimento

Exp.	1	2	3	4	5
ΔP mmH ₂ O					
Ref. A-D	54	79	102,5	129,5	154,5
Ref. A-L	10	14,5	18	23	26,5

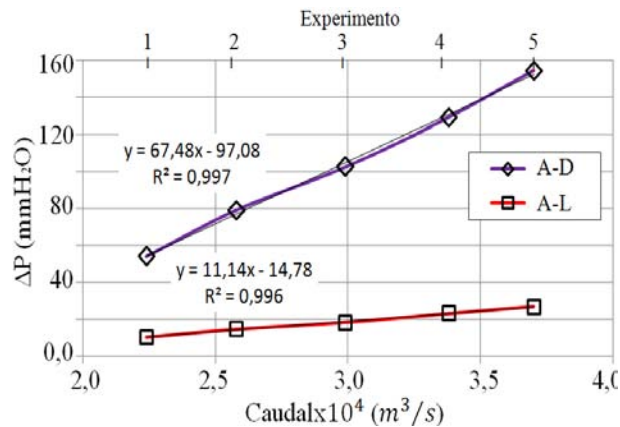


Figura 8. Líneas de tendencia y coeficiente de determinación R^2 .

Durante el funcionamiento de la bomba, para las tomas de lecturas experimentales, estuvieron presentes las vibraciones en el banco de prueba, por tanto, luego de un tiempo estimado de cuatro a seis minutos, cuando las perturbaciones eran mínimas, se procedieron a tomar las lecturas por observación directa del nivel de cada una de las once columnas de agua en la unidad de medida de un milímetro, y para la toma de lectura del nivel del agua que se ubicaba en el medio de la unidad de milímetro se hizo uso de una lupa para la amplificación de la imagen.

Los resultados experimentales obtenidos no cuantifican la magnitud de la presión entre cada referencia, por tener una distancia de separación, por lo cual, es de interés cuantificar y conocer cómo se comporta de manera continua la trayectoria del perfil de presión a lo largo de las paredes del tubo Venturi, siendo de mayor interés entre las referencias C y E, lugar donde se producen las mayores caídas de presión, para esto, se debe simular el flujo mediante la CFD y así conocer lo que realmente podría suceder.

3.2. Resultados numéricos y comparación con los datos experimentales

La simulación de la distribución de la velocidad del flujo isotérmico en el tubo Venturi se muestra en la Figura 9, en la sección transversal y en el plano, donde el incremento de la velocidad del flujo se produce en la garganta, y la disminución en la sección divergente. En la sección divergente las líneas de contorno de velocidad van adquiriendo un perfil parabólico en dirección al eje x, por el efecto de la capa límite. Donde, la velocidad del flujo en la simetría axial del eje x es máxima y disminuye su magnitud hacia las paredes del tubo Venturi, por lo cual se tiene un gradiente de velocidad en el campo de flujo. Cabe señalar, el dominio del flujo que se muestra en la Figura 9, fue simulado con malla estructurada y celdas cuadriláteras, empleando el modelo de turbulencia $k - e$ estándar; y por ser similares, no se exponen otras figuras de las líneas de contorno de velocidad para los resultados $k - \omega$ estándar.

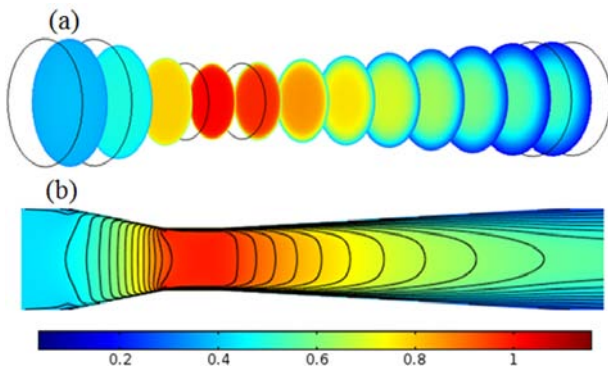


Figura 9. Distribución de velocidad (m/s). (a) En la sección transversal, y (b) Proyectado en el plano.

En la Figura 10, se muestra el comportamiento de los perfiles de velocidad evaluados en la simetría axial del eje x. De acuerdo con todas las trayectorias de los perfiles, hacia el final de la sección convergente el flujo incrementa su velocidad, en la sección de la garganta el flujo alcanza una velocidad máxima en la referencia D, y disminuye la velocidad en la sección divergente. Donde, la magnitud de la velocidad del flujo en la referencia A es menor con respecto a la referencia L, por lo cual, se entiende que el comportamiento del perfil de la velocidad del flujo en la dirección radial, en la referencia A tiene menor curvatura y en la referencia L mayor curvatura.

Los resultados numéricos de los caudales se muestran en la Tabla 7, para cada modelo de turbulencia y tipo de mallado. La mayor magnitud de caudal fue para el modelo de turbulencia $k - e$ estándar y dominio mallado con celdas cuadriláteras, y el menor caudal para el modelo de turbulencia $k - \omega$ estándar y dominio mallado con celdas triangulares. Acotando que el caudal se determinó con la velocidad promedio del flujo mediante el método de integración numérica.

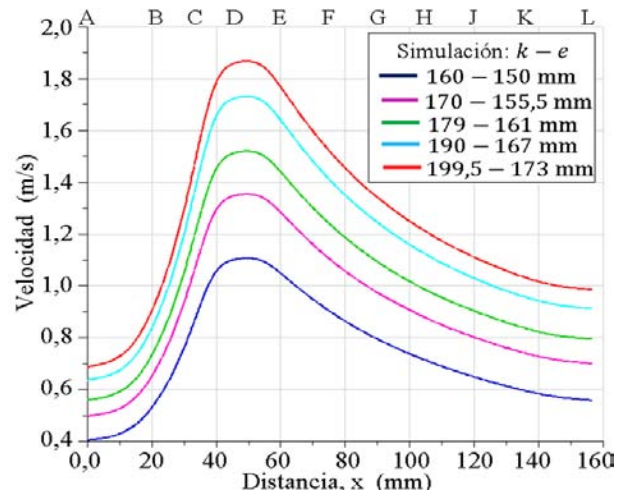


Figura 10. Perfiles de velocidad evaluadas en la simetría axial del eje x, para el modelo de turbulencia $k - e$ estándar.

Al comparar los caudales numéricos presentados en la Tabla 7 con los experimentales presentados en la Tabla 3, se tiene que el mayor error porcentual se presentó para el modelo de turbulencia $k - e$ estándar con un error porcentual de 9,68 % para el dominio mallado con celdas cuadriláteras, y de 8,68 % para la malla con celdas triangulares; donde, el mínimo error porcentual fue de 1,48 % para $k - e$ estándar para el mallado con celdas cuadriláteras, y de 1,01 % para $k - \omega$ estándar para el mallado con celdas triangulares, tal como se muestra en la Tabla 8. Basándose en los resultados, se evidencia que existe una influencia en los resultados numéricos al aplicar un tipo de mallado al dominio computacional.

Tabla 7. Caudales obtenidos para dos modelos de turbulencia y dos tipos de mallas aplicadas

Simulación (mm H ₂ O)	Caudal $\times 10^4$ (m ³ /s)			
	C. cuadrilátera $k-e$	C. cuadrilátera $k-\omega$	C. triangular $k-e$	C. triangular $k-\omega$
160-150	2,29	2,27	2,28	2,26
170-155,5	2,83	2,8	2,8	2,78
179-161	3,19	3,16	3,15	3,12
190-167	3,65	3,61	3,6	3,56
199,5-173	3,94	3,89	3,88	3,84

Tabla 8. Error porcentual de los caudales

Exp	Simulación (mm H ₂ O)	Error porcentual (%)			
		C. cuadrilátera $k-e$	C. cuadrilátera $k-\omega$	C. triangular $k-e$	C. triangular $k-\omega$
1	160-150	2,33	1,48	1,73	1,01
2	170-155,5	9,68	8,64	8,68	7,72
3	179-161	6,74	5,68	5,56	4,57
4	190-167	7,93	6,76	6,5	5,46
5	199,5-173	6,47	5,14	4,9	3,85

Los resultados numéricos de número de Reynolds obtenidos para el diámetro mayor en la referencia A y L se muestra en la Tabla 9, y para el diámetro menor en la referencia D se muestran en la Tabla 10. En la referencia A y L, para las cinco simulaciones, el número de Reynolds se ubicó en el rango de $12100 < Re < 21200$; y en la referencia D, en el rango de $19700 < Re < 34400$. Donde, al comparar los resultados numéricos de número de Reynolds presentados en la Tabla 9 y 10 con respecto a los experimentales de número de Reynolds presentados en la Tabla 4, el error porcentual se ubicó en el rango de 1,02-9,68 %.

Tabla 9. Número de Reynolds obtenidos en el diámetro mayor, en la referencia A y L, para dos modelos de turbulencia y dos tipos de mallas aplicadas

Simulación (mm H ₂ O)	Número de Reynolds, en la referencia A y L			
	C. cuadrilátera		C. triangular	
	<i>k-e</i>	<i>k-ω</i>	<i>k-e</i>	<i>k-ω</i>
160-150	12303	12201	12231	12144
170-155,5	15179	15034	15041	14908
179-161	17106	16935	16917	16758
190-167	19558	19345	19298	19109
199,5-173	21130	20866	20818	20610

Tabla 10. Número de Reynolds obtenidos en el diámetro menor, en la referencia D, para dos modelos de turbulencia y dos tipos de mallas aplicadas

Simulación (mm H ₂ O)	Número de Reynolds, en la referencia D			
	C. cuadrilátera		C. triangular	
	<i>k-e</i>	<i>k-ω</i>	<i>k-e</i>	<i>k-ω</i>
160-150	19992	19827	19875	19735
170-155,5	24666	24431	24442	24226
179-161	27797	27519	27490	27231
190-167	31781	31436	31359	31053
199,5-173	34336	33907	33829	33492

En la Figura 11, se muestran las distribuciones de presiones en la superficie de las paredes de la sección convergente, garganta y divergente, además, la distribución de la presión del flujo interno proyectado en el plano, donde se muestran las líneas de contorno, las cuales son las isóbaras, y se observa de cómo se distribuyen las presiones de forma perpendicular al eje x y hacia las paredes.

Los perfiles de las presiones manométricas obtenidos en las paredes del tubo Venturi se muestran en las Figuras del 12 al 16. Las unidades de las presiones están en milímetros de columna de agua (mmH₂O), y en las mismas gráficas están incluidos los datos de las presiones de los experimentos realizados. Los perfiles

de las presiones corresponden para un dominio mallado con celdas cuadriláteras y para otro dominio mallado con celdas triangulares, para ambos casos, simulados para flujo isotérmico con el modelo de turbulencia *k-e* estándar y *k-ω* estándar.

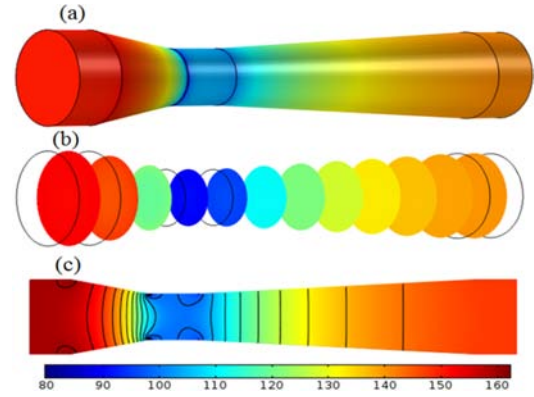


Figura 11. Distribución de presión (mmH₂O). (a) En la superficie de la pared. (b) En la sección transversal, y (c) Proyectado en el plano.

Al observar de forma paralela las Figuras del 12 al 16, todos los perfiles de presiones tienen un comportamiento similar a lo largo de las paredes del tubo Venturi, se interceptan y bordean los datos experimentales. Al final de la sección recta, de la entrada del tubo Venturi, los perfiles muestran un incremento de la presión, incrementando a una magnitud mayor al de la presión de entrada. En el vértice, entre la sección convergente y la garganta, la cual está ubicada en la distancia 38 mm, se produce una caída abrupta de la presión, incluso se presenta una presión negativa para el perfil *k-e* con celdas cuadriláteras para la simulación del experimento 4, y lo mismo sucede para los perfiles *k-e* y *k-ω* con celdas cuadriláteras para la simulación del experimento 5. Asimismo, se produce en la región del otro vértice que se encuentra en el extremo derecho de la garganta en la distancia 54 mm, con caída de presión de menor intensidad, pero sin presencia de presión negativa.

En la sección de la garganta, un tramo de los perfiles tiene un comportamiento convexo, separado uno del otro, quedando en el siguiente orden, de abajo hacia arriba: el perfil *k-e* y el perfil *k-ω*, ambos simulados con el dominio con malla con celdas cuadriláteras, seguidamente el perfil *k-e* y el perfil *k-ω*, ambos simulados con el dominio con malla de celdas triangulares. Y se observa cómo quedan posicionados los cinco datos experimentales de presión en la referencia D. Los tramos de las trayectorias de los perfiles *k-e* con celdas cuadriláteras tienen mayor acercamiento con los datos experimentales. Señalando que la caída de la presión en la garganta se produce porque el flujo pasa con mayor velocidad por la sección estrecha, producto de la alta diferencia de presión del flujo entre la entrada y la salida del tubo Venturi.

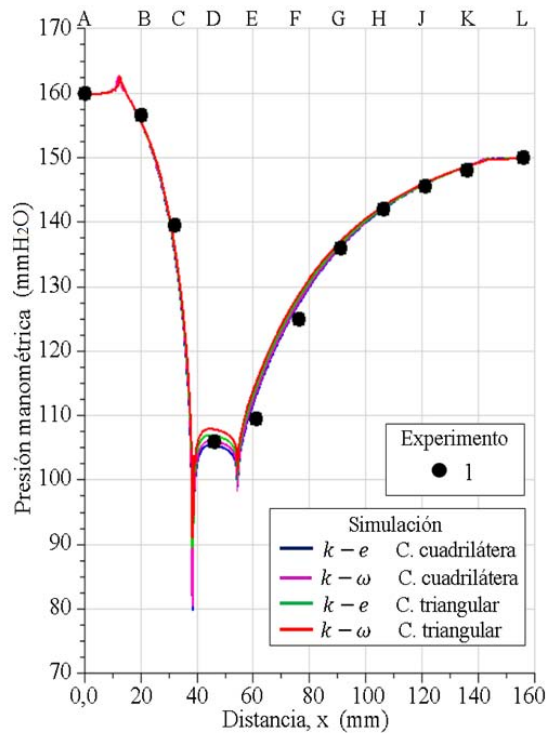


Figura 12. Experimento 1 de presiones de columnas de agua, y perfiles de presiones evaluados en la pared del tubo Venturi. Presión en (mmH₂O): 160 mm en la entrada y 150 mm en la salida.

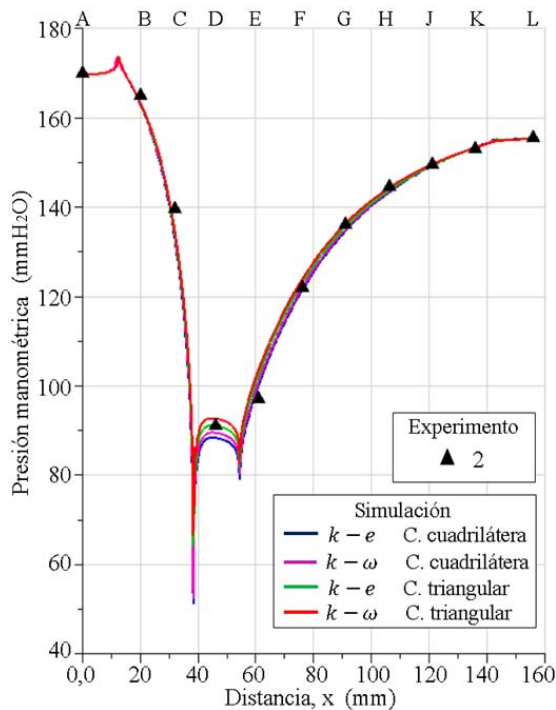


Figura 13. Experimento 2 de presiones de columnas de agua, y perfiles de presiones evaluados en la pared del tubo Venturi. Presión en (mmH₂O): 170 mm en la entrada y 155,5 mm en la salida.

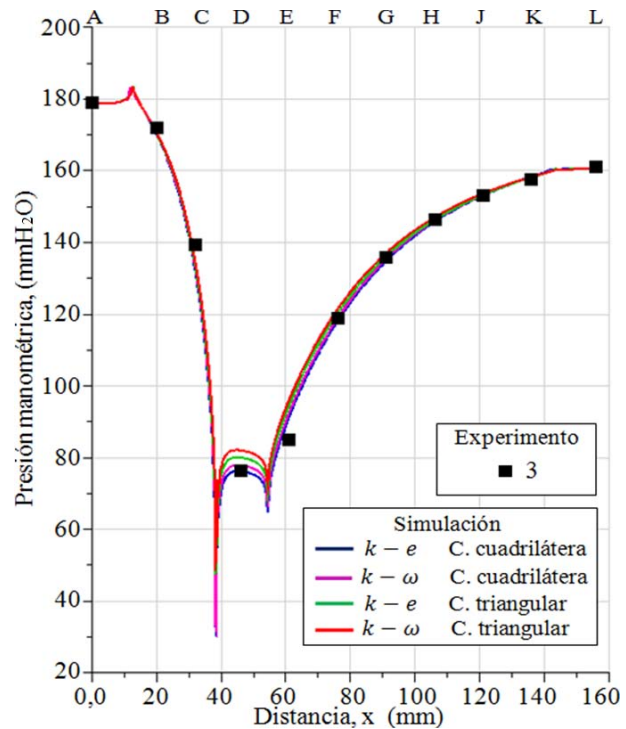


Figura 14. Experimento 3 de presiones de columnas de agua, y perfiles de presiones evaluados en la pared del tubo Venturi. Presión en (mmH₂O): 179 mm en la entrada y 161 mm en la salida.

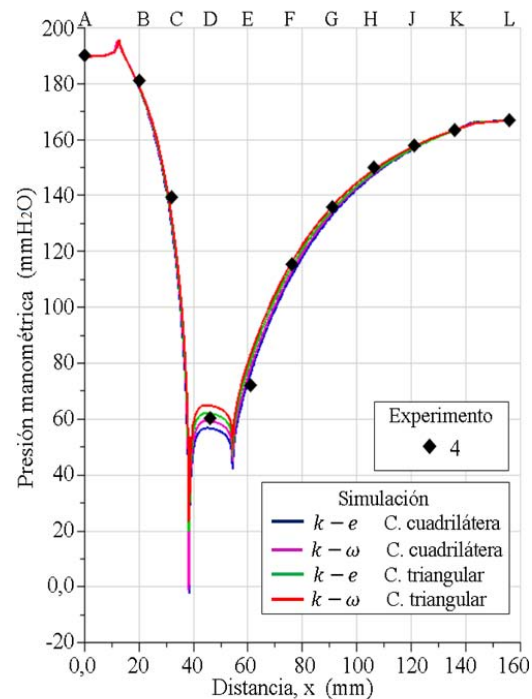


Figura 15. Experimento 4 de presiones de columnas de agua, y perfiles de presiones evaluados en la pared del tubo Venturi. Presión en (mmH₂O): 190 mm en la entrada y 167 mm en la salida.

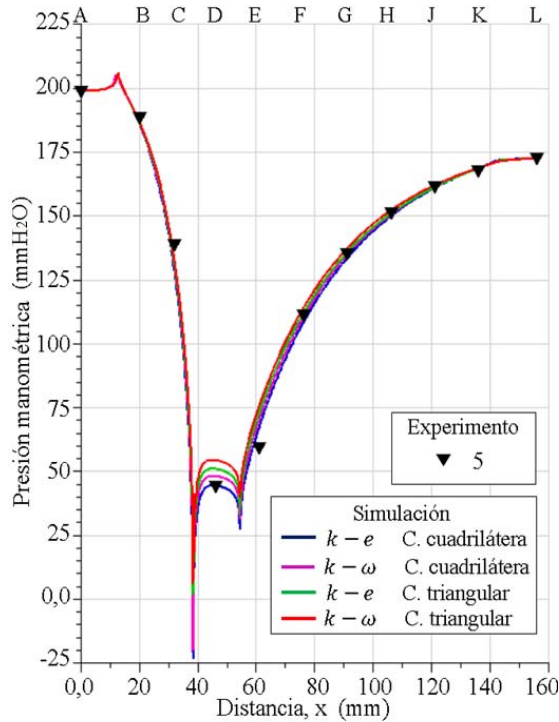


Figura 16. Experimento 5 de presiones de columnas de agua, y perfiles de presiones evaluados en la pared del tubo Venturi. Presión en (mmH₂O): 199,5 mm en la entrada y 173 mm en la salida.

Los resultados numéricos y los datos experimentales en la referencia D se muestran en la Tabla 11. Donde el modelo de turbulencia $k-e$ estándar presentó el mayor error porcentual de 5,88 % para el experimento 4, y para $k-\omega$ estándar fue de 7,84 % para el experimento 5, y menores de estos valores para los demás resultados, esto es, para el mallado con celdas cuadriláteras. Y para la malla con celdas triangulares, correspondiente al experimento 5, $k-e$ estándar presentó el error porcentual de 14,17 %, y $k-\omega$ estándar de 21,66 %, y menores para los demás resultados.

Tabla 11. Datos experimentales y numéricos para la referencia D, para dos modelos de turbulencia y dos tipos de mallas aplicadas

Datos Exp. Ref. D mmH ₂ O	Simulación: Referencia D (mmH ₂ O)				
	Celda cuadrilátera		Celda triangular		
	$k-e$	$k-\omega$	$k-e$	$k-\omega$	
1	106	105,47	106,13	106,99	107,97
2	91	88,51	89,66	91,28	92,86
3	76,5	76,4	78,05	80,22	82,26
4	60,5	56,94	59,57	62,32	65,11
5	45	44,79	48,53	51,38	54,75

Los perfiles de presiones para el modelo de turbulencia $k-e$ estándar, simulado el flujo con el dominio mallado con celdas cuadriláteras, y los datos

experimentales de presión presentados en la Tabla 5 y graficada en la Figura 6, se presentan en la Figura 17, donde se observa que las trayectorias de los perfiles satisfacen la validación con los datos experimentales. En la referencia D, ubicada en la sección de la garganta, las trayectorias de los perfiles son convexas. Aunque no se presenta una gráfica similar a la Figura 17 para el modelo de turbulencia $k-\omega$ estándar, este modelo también tiene validez aunque con un margen de resultados numéricos ligeramente variados con respecto al modelo de turbulencia $k-e$ estándar, tal como se muestran en los resultados de la Tabla 12, anteriormente presentada. Del análisis realizado, los resultados numéricos están influenciados por el tipo de malla aplicado al dominio computacional, siendo la malla estructurada con celdas cuadriláteras la que aporta resultados numéricos más precisos con respecto a la malla con celdas triangulares.

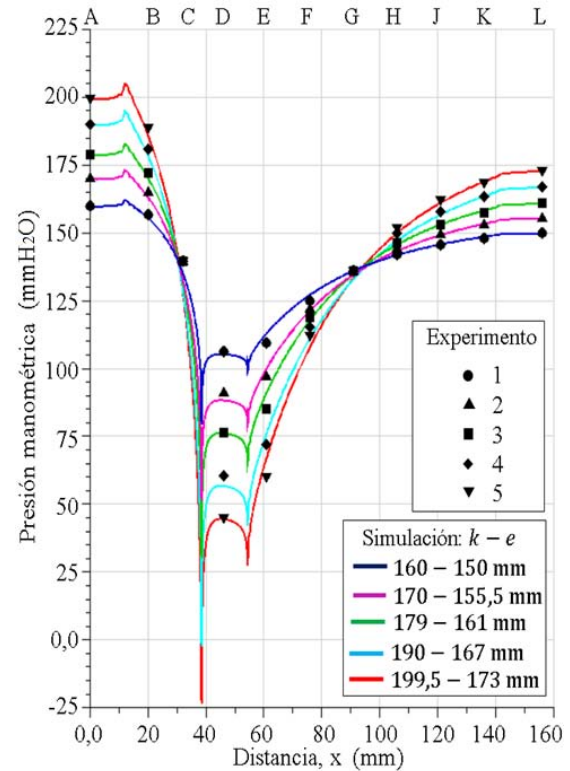


Figura 17. Datos experimentales de presiones de columnas de agua y perfiles de presiones evaluadas en las paredes del tubo Venturi con el modelo de turbulencia $k-e$ estándar.

Las presiones del flujo a lo largo de la simetría axial del eje x, son comparadas con los datos experimentales de las presiones en las paredes del tubo Venturi, se muestran en la Figura 18. Los perfiles se interceptan unos con otros en las referencias C y G, y se observa cómo evolucionan las trayectorias de las caídas de presiones en el extremo izquierdo de la referencia D y del incremento de las presiones en el extremo derecho de

la misma referencia, siendo las trayectorias de las curvas cóncavas en el tramo de la sección de la garganta. También se muestran las ligeras separaciones de los perfiles de los datos experimentales, por lo cual, las magnitudes de las presiones en cada una de las referencias son ligeramente mayores y otras ligeramente menores con respecto a los datos experimentales de las presiones de las paredes. Los perfiles fueron obtenidos para el dominio mallado con celdas cuadriláteras y el modelo de turbulencia $k - e$ estándar.

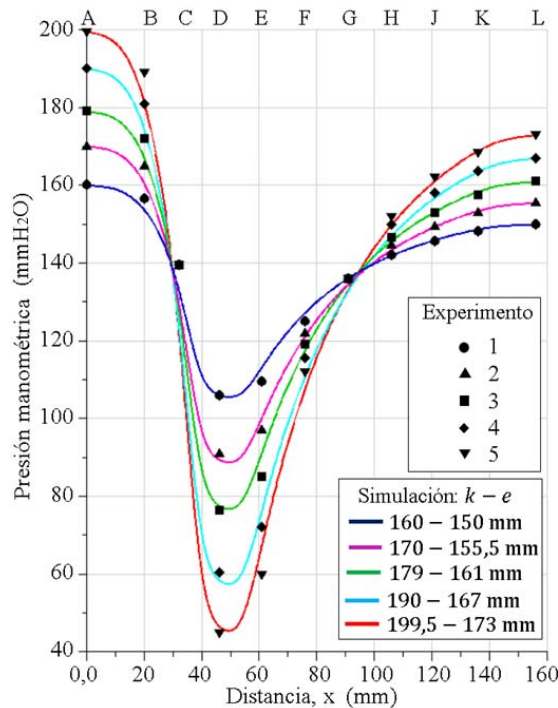


Figura 18. Datos experimentales de presiones de columnas de agua y perfiles de presiones evaluados en la simetría axial (eje x) del tubo Venturi con el modelo de turbulencia $k - e$ estándar.

Al comparar los resultados numéricos de la Figura 18 con la Figura 17, se evidencia para las ubicaciones de las referencias A, B, C, D, E, F, G, H, J, K y L, las presiones tienen tendencia a ser perpendiculares al eje x y a las paredes, formando una trayectoria de curvas conocidas como isóbaras. Sin embargo, donde se dan las uniones de las secciones, en los vértices, la configuración de las trayectorias de las curvas tiene comportamiento distinto producto de variaciones bruscas de presiones, inducido por el perfil geométrico de la sección de contracción gradual y expansión gradual del tubo Venturi.

En la Figura 19, como detalle, unificando las Figuras 17 y 18, para la distancia en el rango de 30-100 mm, se muestran tramos de perfiles superpuestos, para las presiones en las paredes y en el eje x, los cuales son comparados con los datos experimentales para las

referencias C, D, E, F y G. Se observa las caídas de presiones en los extremos de la garganta y cómo las curvas se interceptan y bordean los datos experimentales. Se muestra que las caídas abruptas de las presiones numéricas en la pared se producen para la posición de 38,67 mm, al inicio de la garganta; y las otras caídas de presiones se presentan en la posición de 54,49 mm, la cual está ubicada al inicio de la sección divergente.

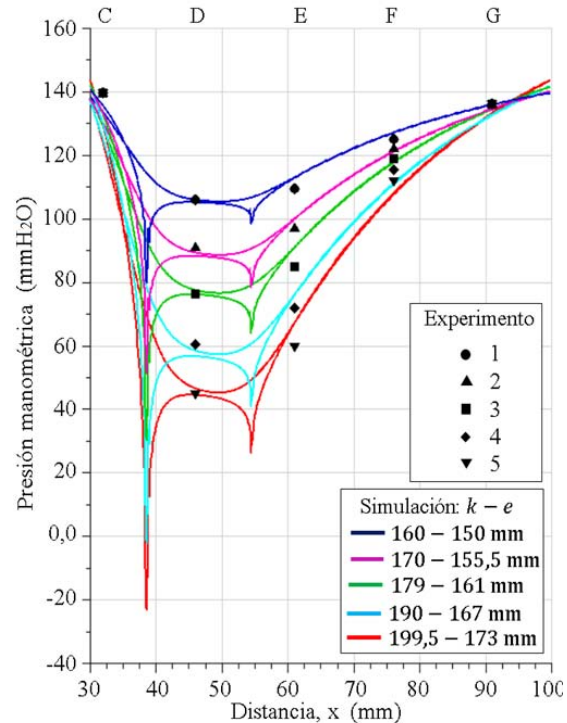


Figura 19. Datos experimentales para las referencias C, D, E, F y G, y tramos de perfiles de presiones evaluados en las paredes y en el eje x del tubo Venturi con el modelo de turbulencia $k - e$ estándar.

En la Tabla 12 se muestran los valores numéricos de las caídas de presiones en la pared en los extremos de la sección de la garganta. Se muestra que la menor caída de presión numérica se presenta en la posición 38,67 mm, para la curva identificada 199,5-173 mm lo cual corresponde para el experimento 5, siendo la magnitud de la caída de presión de $-23,23$ (mmH₂O), y como es una presión negativa, se evidencia que es una presión de succión; así mismo, se tiene para la curva 190-167 mm para el experimento 4 y para la misma posición, una presión de $-2,08$ (mmH₂O).

En el vértice, donde se presenta la presión negativa, corresponde para una región ínfima de un radio de acción estimada de 0,2 mm, donde, la presión negativa es un resultado inesperado, ya que el perfil hidrodinámico de la pared interna del tubo Venturi que mide el caudal, la sección convergente tiene un ángulo medio de diseño, y es con el fin de evitar presencia de presiones negativas.

Tabla 12. Caídas de presiones en los extremos de la garganta

Perfiles numéricos $k - e$	Posición 38,67 mm mmH ₂ O	Posición 54,49 mm mmH ₂ O
160-150 mm	79,75	98,94
170-155,5 mm	51,23	79,08
179-161 mm	30,17	64,73
190-167 mm	-2,08	42,07
199,5-173 mm	-23,23	27,63

Asimismo, se resalta que, durante el experimento 4 y 5 no se observaron en el vértice ubicado a la entrada sección de la garganta presencia alguna de burbujas de aire en esa región y aguas abajo como señal de indicios de cavitación. Por lo cual, el resultado numérico obtenido de la presión negativa, induce a investigar con instrumentos sensibles para captar las posibles burbujas de aire de dimensiones imperceptibles al ojo humano que pudieran estar presentes. Por lo cual, se debe verificar simulando el flujo con otros modelos de turbulencia en trabajo a futuro, para determinar si se presentan o no presiones negativas, y así obtener conclusiones cercanas a la realidad del fenómeno físico.

De la comparación de los resultados numéricos con los datos experimentales, se evidencia que la simulación numérica arroja resultados satisfactorios sustentados en un rango de errores porcentuales aceptables a nivel de ingeniería, por lo cual, quedan validados los modelos de turbulencia $k - e$ estándar y $k - \omega$ estándar. Estos dos modelos de turbulencia validados fortalecen su aplicación en la dinámica de fluidos computacional en la simulación del flujo en dominios computacionales para geometrías simples o complejas en el campo de la ingeniería, y permiten determinar la magnitud de algún parámetro físico que no es posible obtener mediante instrumentos de medición y ecuaciones analíticas.

4. Conclusiones

Según los análisis realizados, para los casos de estudio experimental y numérico, se concluye que: Los caudales numéricos obtenidos para los modelos de turbulencia $k - e$ estándar y $k - \omega$ estándar, al ser comparados con los cinco datos de caudales experimentales, arrojaron errores porcentuales en el rango de 1,01-9,68 %. Así mismo, se determinó el error porcentual en el rango de 1,01-9,68 % para el número de Reynolds. Donde, para los cinco experimentos, el número de Reynolds está en el rango de $12000 < Re < 32300$; y para las simulaciones numéricas, en el rango de $12100 < Re < 34400$.

Los cinco resultados experimentales de las presiones obtenidos en las referencias C y G, donde los diámetros del tubo Venturi allí son diferentes, las presiones en ese lugar no varían su magnitud por más que se incrementa la velocidad del flujo en dichas referencias

por el aumento del caudal. Además, la menor caída de presión se produce en la parte media de la sección de la garganta por el efecto Venturi.

Los perfiles obtenidos con los modelos de turbulencia $k - e$ estándar y $k - \omega$ estándar y que fueron comparados con los datos experimentales de presión, el que arrojó resultado más preciso fue el modelo de turbulencia $k - e$ estándar para el dominio mallado con celdas cuadriláteras, donde los resultados numéricos se ajustaron más a los datos experimentales en la parte media de la sección de la garganta, la cual es una sección crítica por la caída abrupta de la presión del flujo. Lo cual evidencia que el tipo de mallado influye en los resultados numéricos.

En los extremos de la sección de la garganta, en las posiciones 38,67 mm y 54,49 mm, las caídas de presión fueron más abruptas que en la parte media de la garganta, presentándose presiones negativas en la posición 38,67 mm, para las curvas numéricas correspondiente para el experimento 4 y 5.

La menor caída de presión en la pared no se produce en la parte media de la sección de la garganta, sino en los extremos de la misma, para el tubo Venturi estudiado.

En trabajos a futuro, para estudios experimentales del mismo tipo de tubo Venturi, se recomienda manipular la válvula de control, y con los resultados experimentales a obtener, realizar las comparaciones respectivas con los resultados experimentales del presente trabajo.

Asimismo, para casos de estudios numéricos, se recomienda emplear otros códigos de la CFD para simular el flujo de agua empleando otros modelos de turbulencia, y comparar con los resultados numéricos del presente trabajo.

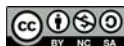
Agradecimientos

Mi agradecimiento a Jehová, mi Dios todopoderoso, mi fuente de sabiduría e inspiración. Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "AJS" Vice-Rectorado Puerto Ordaz (UNEXPO), Bolívar, Venezuela. Al Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica (GMMNS, Group of Mathematical Modeling and Numerical Simulation) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.

Referencias

- [1] F. M. White, *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/2MYFv6r>
- [2] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill

- Interamericana de España S.L., 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/2BUeJWD>
- [3] H. S. Bean, “Fluid meters their theory and application- sixth edition,” The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Tech. Rep., 1971. [Online]. Available: <https://bit.ly/33c2OiM>
- [4] “Invention of the venturi mete,” *Nature*, no. 136, p. 254, 1935. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/136254a0>
- [5] O. Reynolds, “An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels author(s): Osborne reynolds,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 174, pp. 935–982, 1883. [Online]. Available: <https://bit.ly/3211iyT>
- [6] N. Rott, “Note on the history of the reynolds number,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 22, no. 1, pp. 1–12, 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.22.010190.000245>
- [7] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed., S.-V. B. H. N. York, Ed., 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
- [8] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, I. DCW Industries, Ed., 1993. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PxkddF>
- [9] T. V. Karman, “The fundamentals of the statistical theory of turbulence,” *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 131–138, 1937. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/8.350>
- [10] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-layer theory*, S.-V. B. Heidelberg, Ed., 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- [11] D. Lindley, “An experimental investigation of the flow in a classical venturimeter,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 184, no. 1, pp. 133–160, 1969. [Online]. Available: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1969_184_015_02
- [12] J. A. Sattery and M. J. Reader-Harris, “Computation of flow through venturi meters,” *North Sea Flow Measurement Workshop*, 1997. [Online]. Available: <https://bit.ly/2q2oZcT>
- [13] N. Tamhankar, A. Pandhare, A. Joglekar, and V. Bansode, “Experimental and cfd analysis of flow through venturimeter to determine the coefficient of discharge,” *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, vol. 3, no. 4, pp. 194–200, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Nmabh6>
- [14] B. E. Launder and D. B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*, A. P. London, New York, Ed., 1972. [Online]. Available: <https://bit.ly/2qWgZud>
- [15] D. C. Wilcox, “Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models,” *AIAA Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 1299–1310, 1988. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/3.10041>
- [16] G. Alfonsi, “Reynolds-averaged navier-stokes equations for turbulence modeling,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 62, no. 4, p. 040802, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3124648>



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO₂, CO Y DEL FACTOR LAMBDA DE UN VEHÍCULO CON SISTEMA DE INYECCIÓN CONVENCIONAL CON CATALIZADOR Y SIN CATALIZADOR

ANALYSIS OF BEHAVIOR OF CO₂ EMISSIONS, CO AND THE LAMBDA FACTOR OF A VEHICLE WITH A CONVENTIONAL INJECTION SYSTEM WITH CATALYST AND WITHOUT CATALYST

Edgar Vicente Rojas Reinoso^{1,*}, Vicente Javier Romero Hidalgo²,
 Johnny Marcelo Pancha Ramos²

Resumen

El análisis del comportamiento de emisiones de CO, CO₂ sirve para determinar el comportamiento del ciclo de trabajo del motor, además de la verificación de la gráfica del factor lambda, para lo cual se realiza el estudio de la importancia de un catalizador porque en algunas ocasiones los propietarios de los vehículos deciden eliminar el convertidor catalítico de la línea de salida de los gases combustiónados del motor y así circulan por las vías del Ecuador desconociendo la afectación hacia la salud de los ciudadanos y la contaminación directa hacia el medioambiente. Con el análisis del funcionamiento y características de las emisiones contaminantes de un motor de combustión interna ciclo Otto se generan modelos de control para la proyección de la cantidad de gases contaminantes que se emiten al eliminar el convertidor catalítico y de tal forma establecer los niveles de emisiones que un vehículo sin catalizador genera, a pesar de que el motor se encuentre en óptimas condiciones de funcionamiento en diferentes regímenes de giro.

Palabras clave: catalizador, ciclo Otto, gases de combustión, mitigación ambiental.

Abstract

The analysis of the behavior of emissions of CO, CO₂ are clear to determine the behavior of the engine work cycle in addition to the verification of the graph of the lambda factor, for which the study of the importance of a catalyst is performed because sometimes the owners of the vehicles decide to eliminate the catalytic converter from the output line of the combustion gases of the engine and circulate along the roads of Ecuador ignoring the impact on the health of citizens and direct pollution towards the environment. With the analysis of the operation and characteristics of the pollutant emissions of an internal combustion engine Otto cycle, control models are generated for the projection of the amount of pollutant gases that are emitted when eliminating the catalytic converter and thereby establishing the emission levels that a vehicle without a catalyst is generated despite the fact that the engine is in optimal operating conditions at different speeds.

Keywords: catalyst, environmental mitigation, Otto cycle, Pollution.

^{1,*}Docente Investigador, Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: erojas@ups.edu.ec, <http://orcid.org/0000-0001-5658-3055>

²Docente Investigador, Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

<http://orcid.org/0000-0003-2317-7071>, <http://orcid.org/0000-0001-7320-2154>

Recibido: 30-05-2019, aprobado tras revisión: 31-10-2019

Forma sugerida de citación: Rojas Reinoso, E. V.; Romero Hidalgo, V. J. y Pancha Ramos, J. M. (2020). «Análisis del comportamiento de las emisiones de CO₂, CO y del factor lambda de un vehículo con sistema de inyección convencional con catalizador y sin catalizador». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.02>.

1. Introducción

En la actualidad las emisiones contaminantes de un vehículo son factores en constante análisis y estudio para lograr motores más eficientes y con niveles bajos de emisiones contaminantes. Durante varios años los vehículos han sido considerados como una fuente importante de emisiones contaminantes hacia el ambiente debido al uso de motores de combustión interna. Durante el desarrollo del ciclo de funcionamiento del motor y logrando una combustión ideal se obtendría nitrógeno molecular (N_2), agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2). Pero como resultado de los ciclos de funcionamiento de un motor térmico la combustión no llega a ser perfecta, dando lugar a que se generen elementos adicionales como son compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre, humos negros, compuesto de plomo y óxidos de nitrógeno (NO y NO_2) [1]. Entre algunas de las estrategias para reducir los niveles de gases contaminantes se encuentra el uso de convertidores catalíticos a la salida de los gases combustionados del motor mediante reacciones químicas e influenciadas por condiciones como la temperatura, presión y la aplicación de materiales que interactúan con los gases de escape [2]. El uso y aplicación de estos convertidores catalíticos se han desarrollado mediante estudios realizados por cada uno de los fabricantes para que sus vehículos sean más amigables con el medioambiente; de ahí la necesidad de mantenerlos instalados.

La importancia del estudio se ha definido mediante el análisis de los gases contaminantes cuando se elimina el convertidor catalítico; en el cual se considera los valores iniciales de los gases de escape con el convertidor instalado y los valores obtenidos cuando se deja de usarlo para definir un modelo matemático que prediga la importancia de no suspender o desinstalar un convertidor catalítico en la línea de escape.

1.1. Emisiones contaminantes

Los gases contaminantes que se originan en los vehículos actúan como irritantes en las vías respiratorias, perjudican los tejidos alterando su permeabilidad, haciendo que estos sean más vulnerables a desarrollar enfermedades respiratorias y puedan aparecer infecciones virales o bacterianas.

El monóxido de nitrógeno (NO) se forma por la reacción de nitrógeno y oxígeno, a altas temperaturas en la cámara de combustión. El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas rojizo e irritante que al ser inhalado se adhiere en la mucosa nasal formando ácido nítrico. La generación de este ácido provoca una reacción inmediata: la irritación de las vías respiratorias juntamente con un malestar en los ojos; los pulmones son afectados provocando problemas respiratorios y reacciones broncopulmonares.

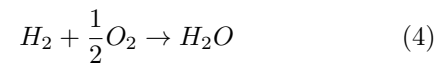
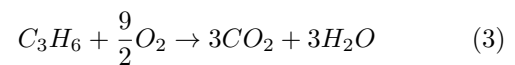
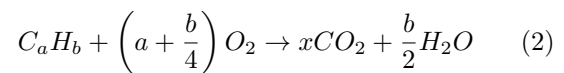
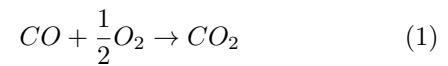
El monóxido de carbono (CO) se genera por la combustión incompleta del combustible por la presencia de bajos niveles de oxígeno; se debe considerar que el monóxido de carbono aumenta con la variación de la relación aire-combustible durante la mezcla. Los hidrocarburos no quemados (HC) producen irritación en los ojos y afectan directamente a las mucosas de las vías respiratorias, además, puede causar un efecto narcótico y son compuestos cancerígenos. Los hidrocarburos son los causantes de la presencia de lluvias ácidas y juntamente con los rayos ultravioletas producen el humo fotoquímico [3].

1.1.1. Convertidor catalítico

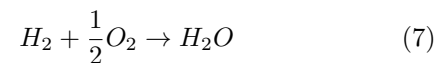
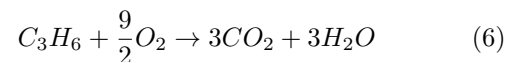
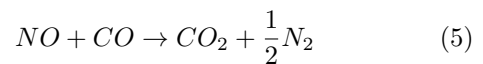
Una solución de metales preciosos, usada con diferentes aleaciones (Al_2O_3) se integra al convertidor catalítico y se instala a la salida de los gases de escape [4].

Otros elementos que complementan la estructura de un convertidor catalítico son el platino (Pt), rodio (Rh) y el paladio (Pd); estos materiales catalíticos integran varios tipos de catalizadores; así por ejemplo el uso del platino y paladio forman el convertidor catalítico de dos vías o conocido como catalizador de oxidación, mientras que estos elementos juntamente con el rodio son usados para los catalizadores de tres vías o de reducción y oxidación [4].

A continuación, se muestran los procesos químicos de reducción en un convertidor catalítico.



Las reacciones generadas en un convertidor catalítico en oxidación son:



Para un mejor desempeño de los catalizadores es necesario que la mezcla aire-gasolina sea dosificada al motor; es decir, posea una composición proporcionada de un kilogramo de gasolina por 14,7 kilogramos de aire. El elemento que registra la composición de la mezcla es un dispositivo de monitoreo llamado sonda lambda [5]. Este dispositivo verifica y permite que una unidad de control realice ajustes constantes sobre la

mezcla aire y combustible, tomando como referencia el porcentaje de oxígeno que existe en los gases combustiónados que salen por el tubo de escape para informar a la unidad de gestión de inyección del motor sobre la cantidad de combustible; esta característica es denominada como factor lambda, y de esto dependerá del funcionamiento del catalizador [5]. Es por ello por lo que algunos convertidores catalíticos en su diseño usan algún tipo de material para disminuir los niveles de oxígeno [6]. Los elementos usualmente aplicados como el cerio (Ce) y el circonio (Zr) almacenan el oxígeno y luego según las condiciones de funcionamiento liberan el oxígeno cuando disminuye la presencia de este en los gases de combustión [6].

2. Materiales y métodos

Para la investigación presentada se ha optado por una estrategia de experimentación basada en un ciclo de Deming, que se amplía hacia la planificación, realización, verificación y actuación fundamentado en una espiral hacia la mejora continua [7].

Se contrastan los parámetros establecidos del funcionamiento de un motor de combustión provocado ciclo Otto (en su línea de escape usa un catalizador de dos vías) con los valores de emisión del mismo motor bajo las mismas características, pero eliminando el convertidor catalítico de la línea de salida de gases de escape.

2.1. Unidad experimental

Para la realización de este estudio se usa como unidad de estudios un vehículo Sedan con un motor FS-ZM con un catalizador de dos vías en su línea de escape. En la Tabla 1 se muestran las características de este motor.

Tabla 1. Características del motor FS-ZM con catalizador de dos vías

Motor	FS-ZM
Cilindraje	1600 cm ³
Potencia máxima	97 kW
Torque	120 Nm
Número de cilindros	4
Relación de compresión	9:01
Sistema de combustible	Inyección multipunto
Tipo de catalizador	Oxidación – 2 vías

Para la obtención de valores de emisión de gases contaminantes se ha usado un analizador de gases combinado marca MAHA modelo Met 6.3. En la Tabla 2 se muestran las características del equipo medición.

Tabla 2. Características del analizador de gases MAHA Met 6.3

Gases mesurables	HC, CO, CO ₂ , O ₂
Principio de medición espectrometría de infrarrojo	HC, CO, CO ₂
Principio de medición detección electroquímica	O ₂
Índice de flujo	3.5 l/min
Clase de precisión	O (OIML)
CO - Rango de medición/Exactitud de medición (máx.)	-15 % Vol. / 0,01
CO ₂ - Rango de medición/Exactitud de medición (máx.)	-20 % Vol. / 0,01
HC - Rango de medición/Exactitud de medición (máx.)	-9999 ppm / 0,1
O ₂ - Rango de medición/Exactitud de medición (máx.)	-25 % Vol. / 0,01
Lambda (calculada)	0,5 - 9,99 / 0,01
Principio de medición	Extinktionsmessung
Rango de medición concentración de partículas	-1100 mg/m ³
Resolución concentración de partículas	1 mg/m ³
Intervalo de medición opacidad	-100%
Área de medición coeficiente de absorción	-9.99 m ⁻¹
Resolución coeficiente de absorción	0.01 m ⁻¹

2.2. Diseño experimental

Para el desarrollo de este trabajo se ha aplicado un diseño experimental basado en la obtención de un modelo matemático que prediga la diferencia que existe al momentos de eliminar el convertidor catalítico de la línea de salida de gases de escape, Considerando como variables de estudio de salida los valores de emisiones de gases de escape en un motor de cuatro cilindros que usa en su diseño un catalizador de oxidación [8,9].

2.3. Variables de respuestas

Las variables de respuestas se han seleccionado con la atención a otras investigaciones realizadas; tomando en cuenta la determinación de la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o Ralentí Prueba Estática, 2000 [7, 10, 11]. En la Tabla 3 se muestran las variables de respuesta.

Tabla 3. Variables de respuestas

Variable	Símbolo	Unidad
Monóxido de carbono	CO	%
Hidrocarburos	HC	ppm
Dióxido de carbono	CO ₂	%
Lambda	λ	-
Oxígeno	O ₂	%

2.4. Régimen de giro

Para el presente estudio se ha considerado como régimen de giro lo establecido en la norma INEN, Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Concentración de Emisiones de Escape en Condiciones de Marcha Mínima o Ralentí Prueba Estática, 2000 y la INEN, Revisión Técnica Vehicular. Procedimientos, 2003; procedimientos usados en otros estudios similares de emisiones. [7]. Considerando para ralentí 700 rpm como primera consideración régimen de giro y la segunda a 2500 rpm [7].

3. Resultados y discusión

Las ecuaciones de control de emisiones controlan el modelo de predicción de los datos de emisiones, pero el dato más relevante para estabilizar dicho modelo es la comparación con el factor lambda, para así conseguir la menor cantidad de emisiones contaminantes de CO₂, CO y HC.

El elemento de control para la disminución de contaminantes es el catalizador; para el análisis son de dos vías, para el mismo modelo de vehículo en este caso que nos permitirá obtener los datos de control para vehículos que poseen el mismo estilo o tipo de catalizador. Las pruebas fueron realizadas a condiciones ambientales normales a una altura de 2850 msnm, e instantáneamente para asegurar la veracidad e inherencia de los datos.

El modelo de predicción de control se representa en la Ecuación 1 que se adapta al comportamiento del manto de control. La Figura 1 indica el comportamiento de la dispersión de datos, la cual demuestra que en condiciones bajas de funcionamiento (ralentí) el vehículo genera picos de alteración no estables (sin catalizador), que provocan que el lambda se dispare, con lo que el CO₂ y CO se incrementan progresivamente y se desestabilizan las emisiones como se puede comprobar en la Ecuación 2 de la Figura 2.

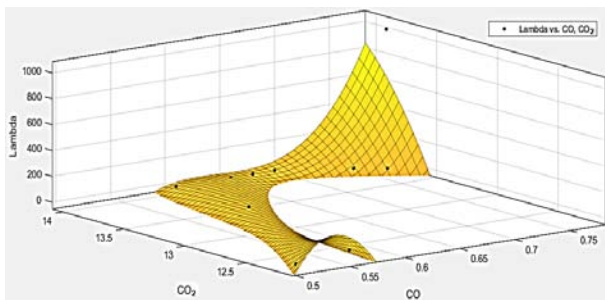


Figura 1. Manto de comportamiento del lambda vs. CO₂ vs. CO en ralentí sin catalizador.

$$f(x, y) = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + p30x^3 + p21x^2y + p12xy^2$$

Coefficientes:

$$\begin{aligned} p00 &= -127.4(-891.9, 637) \\ p10 &= -164.1(-671.2, 343) \\ p01 &= 321.7(-343.1, 986.4) \\ p20 &= 114.3(-497.1, 725.7) \\ p11 &= 386.1(-731.3, 1504) \\ p02 &= -185.9(-2177, 1805) \\ p30 &= 130.4(-213.5, 474.2) \\ p21 &= 84.29(-912.1, 1081) \\ p12 &= -108.7(-1627, 1409) \end{aligned}$$

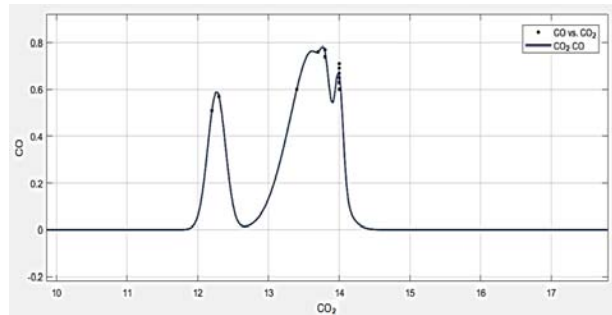


Figura 2. Comportamiento del CO y CO₂

$$\begin{aligned} f(x) &= a1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b1}{c1}\right)^2\right) + \\ & a2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b2}{c2}\right)^2\right) + \\ & a3 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b3}{c3}\right)^2\right) + \\ & a4 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b4}{c4}\right)^2\right) + \\ & a5 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b5}{c5}\right)^2\right) \end{aligned}$$

Coefficientes:

$$\begin{aligned} a1 &= 0.1629(-1.753e^{+42}, 1.753e^{+42}) \\ b1 &= 13.8(-4.279e^{+41}, 4.279e^{+41}) \\ c1 &= 0.08264(-6.414e^{+41}, 6.414e^{+41}) \\ a2 &= 0.4192(-1.066e^{+41}, 1.066e^{+41}) \\ b2 &= 14(-8.979e^{+43}, 8.979e^{+43}) \\ c2 &= 0.07769(-1.604e^{+43}, 1.604e^{+43}) \\ a3 &= 0.3826(-1.532e^{+35}, 1.532e^{+35}) \\ b3 &= 13.41(-6.356e^{+34}, 6.356e^{+34}) \\ c3 &= 0.3917(-3.071e^{+34}, 3.071e^{+34}) \\ a4 &= 0.5899(-9.371e^{+28}, 9.371e^{+28}) \end{aligned}$$

$$b4 = 12.27(-4.638e^{+30}, 4.638e^{+30})$$

$$c4 = 0.1762(-9.03e^{+30}, 9.03e^{+30})$$

$$a5 = 0.5032(-1.75e^{+34}, 1.75e^{+34})$$

$$b5 = 13.7(-1.107e^{+35}, 1.107e^{+35})$$

$$c5 = 0.3243(-9.532e^{+33}, 9.532e^{+33})$$

El modelo de predicción de control es una Ecuación 3 que se adapta al comportamiento del manto de control; y la Figura 3 indica el comportamiento de la dispersión de datos, la cual demuestra que en condiciones bajas de funcionamiento (ralentí) el vehículo genera una condición estable (con catalizador), que ocasiona que el lambda genere su curva senoidal invariable, provocando que el CO₂, CO y las emisiones se estabilicen como se puede comprobar en la ecuación 4 de la Figura 4; cada valor de CO₂ se estabiliza con respecto a un valor de CO.

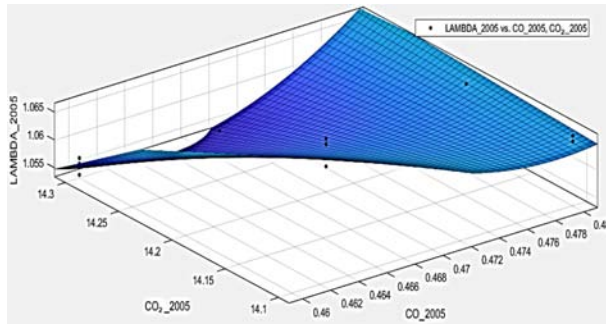


Figura 3. Manto de comportamiento del lambda vs. CO₂ vs. CO en ralentí con catalizador

$$f(x, y) = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy$$

Coefficientes:

$$p00 = 63.85(34.8, 92.9)$$

$$p10 = -161.1(-235.9, -86.2)$$

$$p01 = -3.437(-5.027, -1.846)$$

$$p20 = 62.83(32.05, 93.61)$$

$$p11 = 7.167(3.839, 10.49)$$

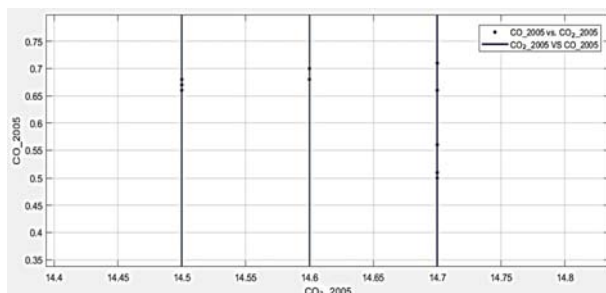


Figura 4. Comportamiento del CO y CO₂

$$f(x) = p1x^3 + p2x^2 + p3x + p4$$

Coefficientes:

$$p1 = 1.257e^{+10}(-1.901e^{+09}, 2.705e^{+10})$$

$$p2 = -5.508e^{+11}(-1.185e^{+12}, 8.326e^{+10})$$

$$p3 = 8.041e^{+12}(-1.216e^{+12}, 1.73e^{+13})$$

$$p4 = -3.913e^{+13}(-8.418e^{+13}, 5.916e^{+12})$$

La estabilidad de las emisiones con base al uso del catalizador en condiciones bajas es inherente en el comportamiento de la inyección, más aún en lo que es consumo de combustible, generando una cantidad mayor de emisiones. Motivo por el cual se genera el mismo análisis en las condiciones de régimen alto de 4000 rpm que es el rango óptimo de funcionamiento con respecto al fabricante para el modelo de estudio (Mazda allegro).

En régimen alto, el motor sin catalizador genera la onda de estabilidad, pero los valores de CO y CO₂ siguen siendo muy oscilantes, lo que genera un lambda de control demasiado rico como se puede observar en la Figura 5 de la Ecuación 5.

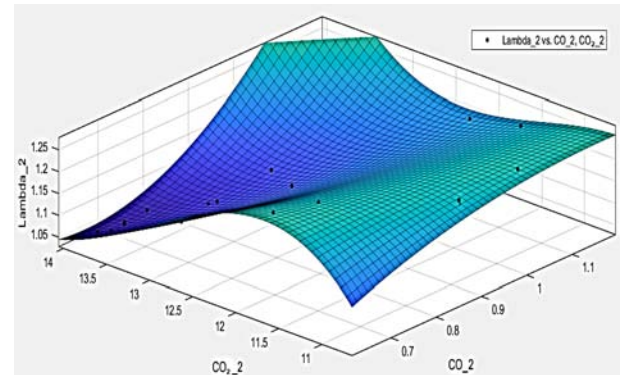


Figura 5. Manto de comportamiento del lambda vs. CO₂ vs. CO en régimen alto (4500 rpm) sin catalizador

$$f(x, y) = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + p30x^3 + p21x^2y + p12xy^2 + p03y^3$$

Coefficientes:

$$p00 = -66.85(-111.5, -22.22)$$

$$p10 = 37.06(2.801, 71.32)$$

$$p01 = 14.25(5.461, 23.03)$$

$$p20 = -6.703(-17.69, 4.28)$$

$$p11 = -5.262(-9.398, -1.126)$$

$$p02 = -0.9794(-1.572, -0.3871)$$

$$p30 = 0.1117(-1.636, 1.86)$$

$$\begin{aligned}
 p_{21} &= 0.5634(-0.04962, 1.177) \\
 p_{12} &= 0.1778(0.05104, 0.3045) \\
 p_{03} &= 0.02223(0.008537, 0.03593)
 \end{aligned}$$

En el motor con catalizador, se nota que la onda senoidal es de un periodo mayor, generando una linealidad en las emisiones de CO y CO₂, debido a que el lambda de control es más estable como se puede observar en la Figura 6 de la Ecuación 6, indicando que el sistema de inyección genera una estequiometría constante en las fases de trabajo.

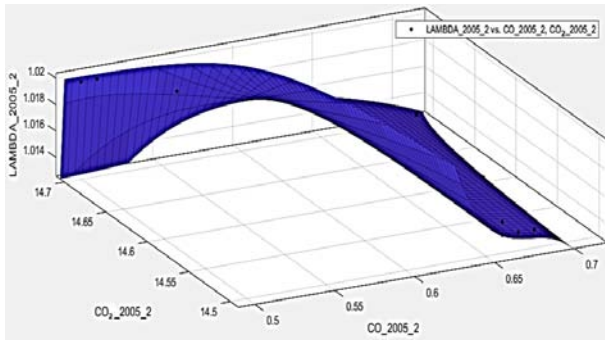


Figura 6. Manto de comportamiento del lambda vs. CO en régimen alto (4500 rpm) con catalizador

$$\begin{aligned}
 f(x, y) = & p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + \\
 & p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2
 \end{aligned}$$

Coefficientes:

$$\begin{aligned}
 p_{00} &= -653.5(-2064, 756.7) \\
 p_{10} &= 899.3(-979.2, 2778) \\
 p_{01} &= 92.64(-109.8, 295.1) \\
 p_{20} &= 99.1(-229.7, 427.9) \\
 p_{11} &= -132.2(-416.8, 152.4) \\
 p_{02} &= -3.273(-10.52, 3.974) \\
 p_{30} &= -0.3921(-1.442, 0.6578) \\
 p_{21} &= -6.694(-29.06, 15.67) \\
 p_{12} &= 4.832(-5.854, 15.52)
 \end{aligned}$$

La diferencia fundamental en el manto de control del lambda es la senoidal estable y la linealidad, enfocando nuevamente que en un rango de 4000 rpm la velocidad de trabajo por ciclos es mayor por ende las emisiones son mucho más altas como se indica en la Figura 5, mientras que en la Figura 6 el manto es estable y por ende las emisiones son de menor grado de variación.

4. Conclusiones

La estabilidad de las emisiones con base al uso del catalizador en condiciones bajas es inherente con el comportamiento del sistema de inyección, más aún en lo que es consumo de combustible, generando una cantidad mayor de emisiones.

En régimen alto, el motor sin catalizador genera la onda de estabilidad, pero los valores de CO y CO₂ siguen siendo muy oscilantes, lo que genera un lambda de control demasiado rico.

En el motor con catalizador, se nota que la onda senoidal es de un periodo mayor, generando una linealidad en las emisiones de CO y CO₂, debido a que el lambda de control es más estable.

En el análisis del manto de control del lambda la senoidal y la linealidad son estables, enfocando nuevamente que en un rango de 4000 rpm la velocidad de trabajo por ciclos es mayor por lo que las emisiones son mucho más altas.

Referencias

- [1] I. Asensio, J. Rincón, R. Camarillo, and A. Martín, "Reciclado de catalizadores de automóviles. análisis de las técnicas actuales y propuestas de futuro," in *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/33NJadl>
- [2] S. Bhattacharyya and R. K. Das, "Catalytic control of automotive nox: a review," *International Journal of Energy Research*, vol. 23, no. 4, pp. 351–369, 1999. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19990325\)23:4%3C351::AID-ER497%3E3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(19990325)23:4%3C351::AID-ER497%3E3.0.CO;2-T)
- [3] G. D'Amato, G. Liccardi, and M. Cazzola, "Environment and development of respiratory allergy: I. outdoors," *Monaldi archives for chest disease = Archivio Monaldi per le malattie del torace*, vol. 49, no. 5, pp. 406–411, December 1994. [Online]. Available: <https://bit.ly/353T8aR>
- [4] K. C. R. Martins, F. Soto Pau, J. A. Silva, A. M. Santos, and R. F. dosSantos, "rtt," *Ingeniería Mecánica*, vol. 8, no. 1, pp. 39–46, 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/2NKO0HJ>
- [5] L. Martín, J. L. Arranz, O. Prieto, R. Trujillano, M. J. Holgado, M. A. Galán, and V. Rives, "Simulation three-way catalyst ageing: Analysis of two conventional catalyst," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 44, no. 1, pp. 41–52, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00008-0)
- [6] R. A. Daley, S. Y. Christou, A. M. Efstathiou, and J. A. Anderson, "Influence of oxychlorination

- treatments on the redox and oxygen storage and release properties of thermally aged pd-rh/cexzr1-xo2/al2o3 model three-way catalysts,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 60, no. 1, pp. 117–127, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.03.002>
- [7] N. Rivera, J. Chica, I. Zambrano, and C. García, “Estudio Del Comportamiento De Un Motor Ciclo Otto De Inyección Electrónica Respecto De La Estequiometría de la mezcla y del adelanto al encendido para la ciudad de Cuenca,” *Revista Politécnica*, vol. 40, pp. 59–67, 10 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/376fV7F>
- [8] INEN, “Inen 2 203:2000. gestión ambiental. aire. vehículos automotores. determinación de la concentración de emisiones de escape en condiciones de marcha mínima o ralentí prueba estática,” in *Servicio Ecuatoriano de Normalización*, 2000. [Online]. Available: <https://bit.ly/2CLVbnG>
- [9] D. D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, J. W. . Sons, Ed., 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2qSdxkj>
- [10] INEN, “Inen 2 204:2002 gestión ambiental aire vehículos automotores límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de gasolina.” in *Servicio Ecuatoriano de Normalización*, 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/375VPua>
- [11] —, “Inen 2 349:2003. revisión técnica vehicular. procedimientos,” in *Servicio Ecuatoriano de Normalización*, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/33LUptC>



PREDICCIÓN DE EMISIONES DE CO Y HC EN MOTORES OTTO MEDIANTE REDES NEURONALES

PREDICTION OF CO AND HC EMISSIONS IN OTTO MOTORS THROUGH NEURAL NETWORKS

Rogelio Santiago León Japa¹, José Luis Maldonado Ortega¹,
 Wilmer Rafael Contreras Urgilés^{1,*}

Resumen

En el presente trabajo se explica la aplicación de RNA (redes neuronales artificiales) para la predicción de emisiones contaminantes generadas por fallas mecánicas en motores de encendido provocado, de la cual se puede cuantificar el porcentaje de CO (% monóxido de carbono) y el particulado por millón HC (ppm hidrocarburos sin quemar), a través del estudio de la fase de admisión del ciclo Otto, la cual es registrada por medio de la implementación física de un sensor MAP (*Manifold Absolute Pressure*). Se aplica un riguroso protocolo de muestreo y consecuente análisis estadístico. La selección y reducción de atributos de la señal del sensor MAP se realiza en función del mayor aporte de información y diferencia significativa con la aplicación de tres métodos estadísticos (ANOVA, matriz de correlación y Random Forest), de la cual se obtiene una base de datos que permite el entrenamiento de dos redes neuronales feed-forward backpropagation, con las cuales se obtiene un error de clasificación de $5.4061e^{-9}$ y de $9.7587e^{-5}$ para la red neuronal de CO y HC respectivamente.

Palabras clave: predicción, emisiones contaminantes, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no combustiónados (HC), diagnóstico, redes neuronales artificiales.

Abstract

This paper explains the application of RNA (artificial neural networks) for the prediction of pollutant emissions generated by mechanical failures in ignition engines, from which the percentage of CO (% carbon monoxide) and the particulate can be quantified. per million HC (ppm unburned hydrocarbons), through the study of the Otto cycle admission phase, which is recorded through the physical implementation of a MAP sensor (*Manifold Absolute Pressure*). A rigorous sampling protocol and consequent statistical analysis is applied. The selection and reduction of attributes of the MAP sensor signal is made based on the greater contribution of information and significant difference with the application of three statistical methods (ANOVA, correlation matrix and Random Forest), from which a base of data that allows the training of two neural networks feed-forward back-propagation, with which we obtain a classification error of $5.4061e^{-09}$ and $9.7587e^{-05}$ for the neural network of CO and HC respectively.

Keywords: prediction, pollutant emissions, carbon monoxide (CO), non-combustion hydrocarbons (HC), diagnostics, neural networks.

^{1,*}Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT), Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador. Autor para correspondencia ✉: rcontreras@ups.edu.ec

<http://orcid.org/0000-0003-2142-3769>, <http://orcid.org/0000-0002-3846-2599>,

<http://orcid.org/0000-0003-2300-9457>

Recibido: 15-05-2019, aprobado tras revisión: 05-11-2019

Forma sugerida de citación: León Japa, R. S.; Maldonado Ortega, J. L. y Contreras Urgilés, W. R. (2020). «Predicción de emisiones de CO y HC en motores Otto mediante redes neuronales». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 30-39. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.03>.

1. Introducción

En la actualidad, el área del transporte automotor representa una de las fuentes principales de contaminación atmosférica; en efecto la descarga de contaminantes al ambiente tiene su origen en el acelerado crecimiento poblacional y desarrollo de diversos centros urbanos, por lo que el deterioro de la calidad del aire es por fuentes: móviles (vehículos), fijas (industria) y de área (actividades domésticas y servicios).

El área vehicular (vehículos a gasolina y diésel) es uno de los principales emisores de combustibles fósiles quemados al medio ambiente, debido a los gases contaminantes que se producen durante el funcionamiento del transporte automotor, siendo las principales emisiones: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos no combustionados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), de tal manera que afectan a la salud pública y equilibrio de los diferentes ecosistemas.

Por lo antes expuesto, es necesario desarrollar nuevas técnicas especializadas y metodológicas para conseguir diagnósticos asertivos de fallos mecánicos, como también de emisiones de gases de escape; simultáneamente el uso de redes neuronales artificiales y matemática computacional, a causa de la complejidad de análisis e interpretación de los parámetros de operación del MEP, de tal manera que se determinen los fallos mecánicos y las emisiones que estos provocan, en tiempos cortos de diagnóstico con optimización de recursos. La contaminación atmosférica tiene efectos nocivos para la salud de todos, así lo demuestra la investigación llevada a cabo por Ballester [1], quien muestra que en Francia, Suiza y Austria el 6 % de la mortalidad y un número importante de nuevos casos de enfermedades respiratorias en estos países puede atribuirse a la contaminación atmosférica, siendo la mitad de este impacto debido a la contaminación emitida por los vehículos de motor.

La investigación de Restrepo *et al.* [2] estima alarmantes aportes de emisiones contaminantes que genera esmog y contribuye al efecto invernadero en la ciudad de Pereira. El estudio indica el aporte de contaminación de cada categoría vehicular según un *software* del modelo internacional de emisiones y una extrapolación, los resultados indican que vehículos particulares aportan más del 80 % de las emisiones de CO, el 60 % de CO₂, 65 % de NO_x, 40 de SO_x y en las motos que aportan alrededor del 65 % de PM (material particulado).

La utilización de redes neuronales es considerada una técnica de gran contribución en el análisis de parámetros internos de los motores MEP, así lo demuestra Li *et al.* [3] mediante la aplicación de una red neuronal para la predicción de las emisiones de NO_x, el estudio utiliza relaciones de intensidad de radicales de llama, junto con la temperatura de llama y las emisiones de NO_x, para entrenar la red neuronal.

Cortina [4] propone un modelo de predicción de concentración de los contaminantes en la ciudad de Salamanca (México), los contaminantes más críticos son SO₂ y PM₁₀, el modelo hace uso de redes neuronales artificiales (RNA) combinadas con algoritmos de agrupamiento, el estudio usa determinadas variables meteorológicas como factores que influyen en la concentración de contaminantes.

Es pertinente reducir las emisiones de CO, HC y NO_x de los motores de combustión interna de encendido por ignición, porque son causantes de diversos problemas ambientales, como la contaminación del aire y el calentamiento global, Martínez *et al.* [5] utilizaron redes neuronales artificiales (ANN) para predecir las emisiones de escape de un MEP de 1.6 l, con el objetivo de optimizar el MEP, al reducir las emisiones de CO, HC y NO_x, cuyas entradas provinieron de seis parámetros operativos del motor y las salidas fueron tres emisiones de escape resultantes.

De igual forma, Fontes *et al.* [6] aplican redes neuronales mediante un perceptrón multicapa (MLP) con una capa oculta como un clasificador del impacto de la calidad del aire en la salud humana, utilizando solo datos de tráfico y meteorológicos como entradas. Estrategias paralelas y combinadas se pueden emplear para la determinación de concentraciones de emisiones, por ejemplo, un aprendizaje híbrido de la red neuronal artificial (ANN) con el algoritmo genético de clasificación no dominada – II (NSGAI) para mejorar la precisión y predecir las emisiones de escape de un motor a gasolina de encendido por ignición de 4 tiempos [7].

Se puede aplicar diferentes métodos para analizar y predecir emisiones, como el modelo de regresión lineal multivariante para analizar la relación entre contaminantes atmosféricos y factores meteorológicos. López y Pacheco [8] muestran que el benceno tiene como fuentes humo del tabaco, gasolineras, emisiones industriales y tubo de escape de automóviles en la zona urbana de la ciudad de Cuenca (Ecuador), genera un aumento en el número de casos clínicos tales como: asma (36,34 %), bronconeumonía (12,19 %), bronquiolitis (16,89 %), bronquitis (6,29 %), faringitis (12,41 %), neumonía (11,73 %) y rinitis (3,67 %), todo esto por el incremento en una unidad de su concentración; por otra parte, el PM₁₀ presenta una relación positiva con la trombosis venosa ocasionando un incremento de 3,56 % de casos clínicos por cada unidad que incrementa su concentración. Guadalupe [9] aplica una nueva metodología de modelación de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres en Quito (Ecuador), el modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE Model), el cual engloba una metodología tipo *bottom – up*, que reúne gran cantidad de información para conformar el inventario de emisiones.

Las estrategias de predicción de concentraciones de gases son variadas en la actualidad. León y Piña [10]

presentan un modelo de predicción de emisiones (NO_x , CO , CO_2 , HC y O_2) aplicado en vehículos a gasolina, con la utilización de redes neuronales (ANN), las variables de entrada en la red neuronal son PME (presión media efectiva), rpm, carga y MAP, también el modelo predice la carga del motor, asimismo Contreras *et al.* [11] han propuesto un sistema de diagnóstico que puede detectar fallos mecánicos en motores de encendido por ignición de ciclo Otto, mediante redes neuronales (RNA), el sistema se sustenta en la utilización de las señales de los sensores MAP y CMP, y tiene un error de clasificación de 1.89e^{-11} .

El sistema de predicción propuesto puede determinar emisiones contaminantes y los fallos mecánicos que provocan las determinadas emisiones, tales como: monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos sin quemar (HC), el diagnóstico que realiza el sistema de predicción no lo realiza la ECU (Engine Control Unit). El sistema se basa en la presión del colector de admisión, la cual es registrada mediante la implementación física de un sensor MAP, por lo que el sistema tiene la facultad de reducir al mínimo el tiempo de diagnóstico; el sistema no utiliza variables de la calidad del aire de la ciudad, tampoco meteorológicas para el entrenamiento de la RNA, por lo que constituye un avance significativo para la predicción de emisiones de gases de escape y determinación de fallos mecánicos, resulta confiable y accesible poner en marcha este sistema en centros de servicio automotor y de revisión técnica vehicular (RTV).

2. Métodos y materiales

En la presente sección se desarrollan las temáticas principales que tienen que ver con la configuración experimental e instrumentación mínimamente invasiva, condiciones de adquisición de muestras, metodología para la adquisición de datos, obtención de matriz de análisis y reducción de atributos, selección de atributos para entrenamiento de la RNA y algoritmo de la red neuronal en Matlab para el diagnóstico y predicción de emisiones.

2.1. Configuración experimental e instrumentación mínimamente invasiva

El estudio tiene como consideración principal evitar el despiece de elementos y sistemas del motor de un vehículo para diagnosticar sus fallas mecánicas y predecir emisiones contaminantes, por lo que se mide la depresión del motor mediante la instalación de un sensor MAP en una toma de vacío del múltiple de admisión, ubicándolo después de la mariposa de aceleración, de tal manera que la conexión no afecta el funcionamiento del MEP.

En la Tabla 1, se resumen las características del

motor a prueba y en la Tabla 2, se indica la instrumentación aplicada.

Tabla 1. Características de la unidad experimental

Característica	Valor
Modelo	Hyundai
Número de cilindros	4
Tren de válvulas	DOHC
Sistema de inyección	MFI
Cilindrada	2000 cc
Potencia	175 CV @ 6000 rpm
Torque	168 N.m @ 4000 rpm
Combustible	Gasolina (RON 95)
Índice de compresión	10.5: 1

Tabla 2. Instrumentación aplicada

Característica	Valor
Computadora personal	PC
Escáner automotor	Multiscan (Hanatech) OBDI, OBDII, EOBD y CAN. Motor, Transmisión,
Conexión	ABS, Airbag. Ni DAQ-6009
Diagnóstico	8 AI de 14 bits, a 48 KS/s 2 AO de 12 bits
Tarjeta de adquisición de datos	
Entradas	
Salidas	
Presión de admisión	MAP
Rango de presión	20-117 KPa
Voltaje	3.2V @ 1600 m.s.n.m Piezoeléctrico
Tipo de sensor	
Analizador de gases para vehículos	QROTECH / QGA 6000
Rango de medición CO	0.0 9.99 %
Resolución	0.01 %
Rango de medición HC	0.0 9999 ppm
Resolución	1 ppm

La identificación respectiva de cada cilindro del motor se realiza mediante el registro de la señal del sensor de posición del árbol de levas (CMP).

En la Figura 1, se presenta la unidad experimental puesta a prueba Motor Hyundai Sonata 2.0 DOHC, un analizador de gases, una computadora personal (PC) y un escáner automotor. En la Figura 2, se muestra la conexión del sensor tipo MAP, la toma de vacío en el colector de admisión y la herramienta de adquisición de datos Ni DAQ-6009.



Figura 1. Instrumentación en el motor.



Figura 2. Conexión del sensor MAP.

2.2. Condiciones de adquisición de muestras

Se realiza la instalación del sensor de presión de admisión ubicándolo en el colector de admisión del MEP, consecuentemente se adquiere muestras de emisiones de NO_x , CO, CO_2 y HC mediante el analizador de gases, la señal del sensor MAP con una tarjeta NI DAQ-6009 en conjunto con el software LabVIEW se registra las muestras MAP.

Las muestras de presión y emisiones contaminantes se adquieren en ralentí aproximadamente a 850 rpm con un rango de temperatura del motor de entre 92 y 99 °C, carga del motor de 35 % y se utiliza el escáner automotor para corroborarlas. Sobre la base de un estudio pre-experimental realizado en la investigación se determinó que la señal del sensor MAP posee picos de mayor frecuencia, de tal manera que se realiza la toma de muestras a una velocidad de 10 KHz en un tiempo de 5 segundos para cada una de las señales, dicha velocidad supera el criterio de Nyquist (1.416 KHz) [11].

2.3. Metodología para la adquisición de datos

En la Figura 3 se presentan los elementos físicos necesarios para el correspondiente diagnóstico de fallas mecánicas y predicción de emisiones contaminantes.



Figura 3. Elementos necesarios para la toma de datos.

Para obtener los datos de las señales de los sensores MAP y CMP se aplica el proceso representado en el flujograma de la Figura 4.

El proceso de obtención de datos se inicia con la revisión del motor en correcto funcionamiento o falla supervisada, posterior a ello se procede a inspeccionar la conexión de los sensores. Si la conexión es correcta, se graba la señal con el software Labview y se registra en un archivo de Excel, de lo contrario, se procede a verificar la conexión de los sensores [11]. Para registrar las señales se aplica el procedimiento antes descrito tanto para el caso de motor en buen funcionamiento como para el motor con falla supervisada, Figura 4 (a); 4 (b) [11]. El proceso de adquisición de datos se realiza 20 veces para cada una de las condiciones del motor.

En la Tabla 3 se indica el total de seis fallas que se generan en la unidad experimental MEP, cada una con su respectivo código de identificación; también se indica la condición del motor en óptimo funcionamiento.

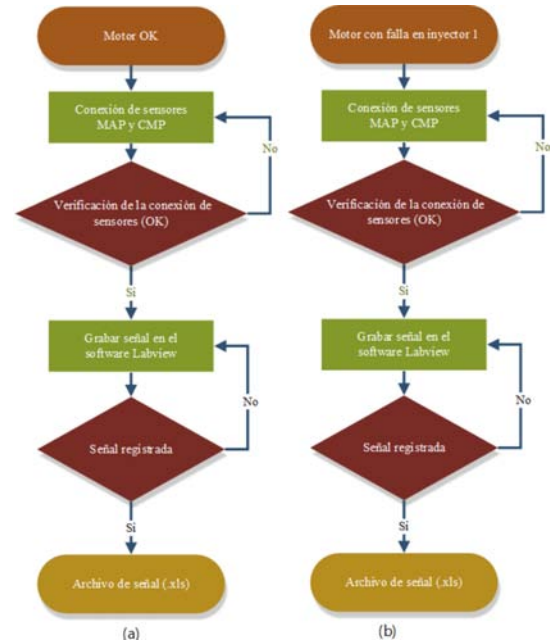


Figura 4. Flujograma de proceso para la adquisición de datos (a) motor ok, (b) motor con falla.

Tabla 3. Condiciones funcionales en la unidad experimental MEP

N.º	Tipo de condición mecánica	Código de identificación
1	Motor en óptimo funcionamiento	100
2	Falla inyector 1	200
3	Falla inyector 2	300
4	Falla inyector 3	400
5	Falla inyector 4	500
6	Falla en bobina 1-4	1000
7	Falla en bobina 2-3	1100

2.4. Obtención de matriz de análisis y reducción de atributos

Se realiza un corte completo en la señal del sensor MAP que corresponde a un ciclo del motor ($720^\circ \pm 180^\circ$), tomando en cuenta el reglaje de distribución de adelante a la apertura de admisión (AAA) y retraso de cierre de admisión (RCA), correspondiente a cada uno de los cilindros [11]. Se desarrolla un ventaneo de la señal del sensor tipo MAP para cada cilindro, la cual se observa en la Figura 5.

Una vez realizada la toma de señales temporales se procede a desarrollar un algoritmo en el *software* Matlab para la correspondiente lectura y obtención de matriz general con 18 atributos, que son: media geométrica, máximo, mínimo, mediana, covarianza, varianza, desviación estándar, moda, factor de curtosis, coeficiente de asimetría, energía potencia, área bajo la curva, entropía, coeficiente de variación, rango, raíz media cuadrática y factor de cresta [11].

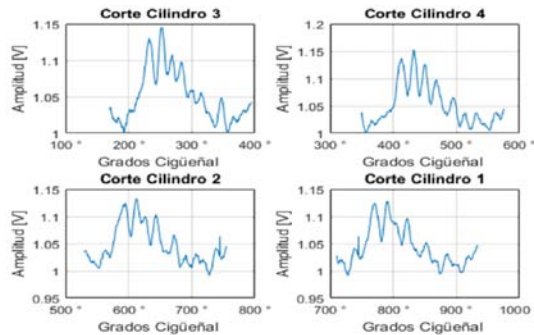


Figura 5. Ventaneo de la señal del sensor tipo MAP por cada cilindro.

Para la selección y reducción del número de atributos se analiza la matriz general a través de 3 métodos estadísticos: ANOVA, matriz de correlación y Random Forest.

La aplicación del método estadístico ANOVA de un solo factor, permite determinar los mejores atributos que ingresan a la matriz general, mediante el análisis de los 18 atributos, tomando en consideración en el método el mayor valor de R^2 puesto que los valores cercanos al 100 % indican que existe un correcto ajuste de los datos al modelo, es decir, se determina la variación entre los atributos. Además, en el método se consideran los valores de p próximos a 0 que determinan si los atributos son estadísticamente significativos [11].

Respecto a la matriz de correlación, se descartaron los atributos que contienen coeficientes próximos a -1 o 1, dado que con los mismos existe una relación fuerte entre las variables, ya sea negativa o positiva, respectivamente. En efecto, se seleccionaron los atributos con coeficientes próximos a cero, puesto que con estos atributos no existe una correlación fuerte entre las variables [11].

En cuanto al método de Random Forest, permite obtener la estimación de importancia de atributos con uso de los métodos de Curvature test, Standard CART e Interaction test. Posterior a ello, se aplicó el análisis de Pareto para seleccionar los atributos de mayor prioridad, considerando solo el primer 95 % de la distribución acumulada [11].

2.5. Selección de atributos para entrenamiento de la RNA

Para seleccionar los atributos que serán considerados en la entrada de la red neuronal se realizó un análisis de coincidencia de la matriz general de la cual se seleccionaron los atributos que más se repiten entre los resultados de cada método estadístico aplicado [11]. Los atributos que más se repiten se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Atributos utilizados para entrenar la red neuronal artificial

Atributos estadísticos	Número de repeticiones
Área (v^2)	5
Energía (J)	5
Entropía (J)	4
Máximo (V)	4
Media (V)	5
Mínimo (V)	5
Potencia (mW)	5
RMS (V)	5

2.6. Algoritmo de la red neuronal en Matlab para el diagnóstico y predicción de emisiones

Mediante el uso de la plataforma de RNA del software Matlab se realizaron diferentes configuraciones para obtener dos redes neuronales para la emisión contaminante CO y HC, respectivamente, con un mínimo error de clasificación.

En la Figura 6 se presenta el flujograma para la creación de las respectivas redes neuronales artificiales de CO y HC.

El algoritmo inicia con la lectura de la matriz de entrada y respuesta respectiva para la RNA. Luego se normaliza el vector de entrada y la respuesta con el valor máximo de cada matriz con el objetivo de optimizar la creación de la RNA. Una vez normalizada la matriz de atributos se procedió a la creación de la RNA [11].

Las redes neuronales se establecen de acuerdo con las características indicadas en la Tabla 5.

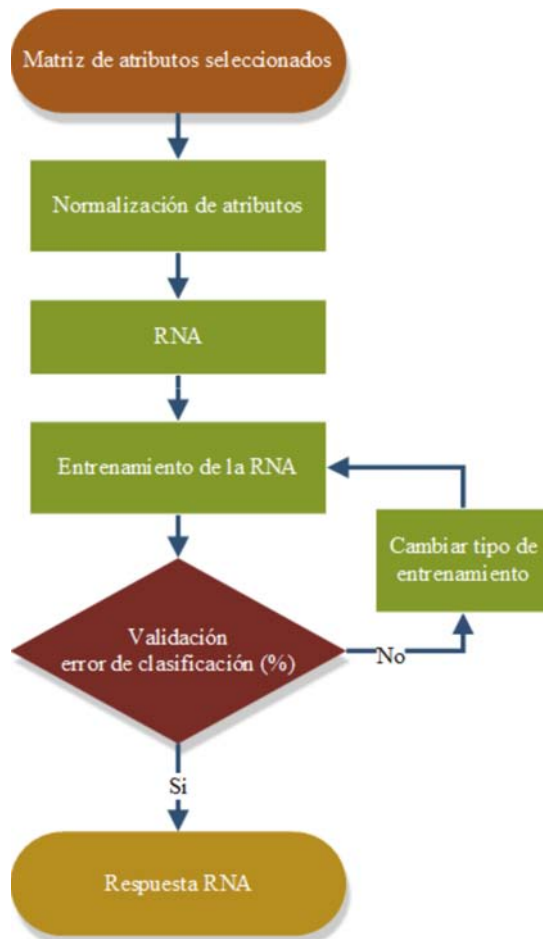


Figura 6. Flujograma de creación de RNA.

Tabla 5. Atributos utilizados para entrenar la red neuronal artificial

Característica	Tipo
Modelo	Backpropagation
Tipología	4 capas Feedforward
On line/Off line	Off
Aprendizaje	No supervisado
Regla de aprendizaje	Corrección de error
Asociación	Heteroasociación
Salida	Análoga

En la Figura 7 se observan los parámetros de la creación de la RNA de tipo *feed-forward backpropagation* para la predicción de la emisión contaminante CO.

En la Figura 8 se observan los parámetros de la creación de la RNA de tipo *feed-forward backpropagation* para la predicción de la emisión contaminante HC.

Una vez creadas las redes, se procedió a su entrenamiento y para ello se consideraron los parámetros como: tipo de algoritmo, número de épocas y el error máximo.

A continuación, se presentan los pasos y fórmulas a utilizar para entrenar la red neuronal:

1. Los pesos de la red neural se inicializan con valores pequeños aleatorios.
2. Se ingresa un patrón de entrada a la red con las diferentes condiciones del motor X_p (X_{p1} , X_{p2} , ... X_{pn}) y se especifica la salida deseada de la red como Y_m que sería el valor de emisiones.
3. Se calcula la salida actual de la red.

La arquitectura de la red se muestra en la Figura 9, donde el subíndice p indica el p -ésimo vector de entrenamiento, j el número de neurona oculta y el índice i varía desde 1 hasta el número de entradas de la capa de entrada.

Con las redes previamente entrenadas se verificó el error de clasificación, respectivamente, en la red de CO y red HC, si el error es mayor al 5%, se procede a cambiar los parámetros para disminuir el error de clasificación.

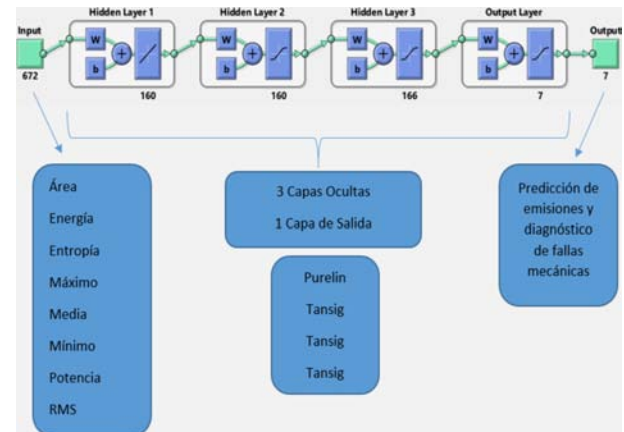


Figura 7. Estructura de la red neuronal CO.

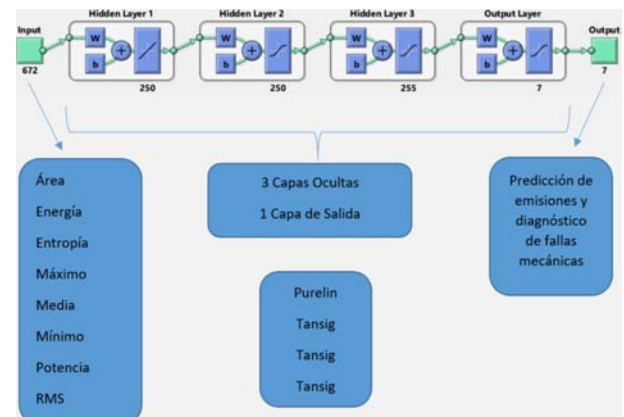


Figura 8. Estructura de la red neuronal HC.

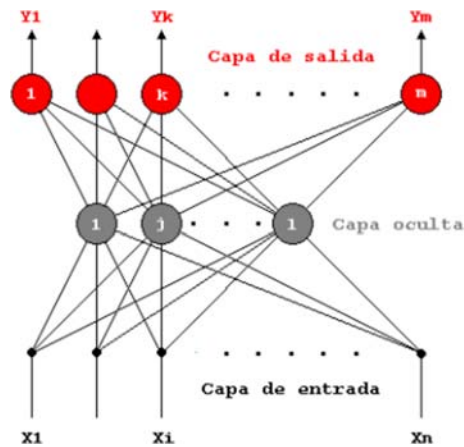


Figura 9. Arquitectura de la red *feed-forward*

La red neuronal de CO utiliza la función de entrenamiento *trainscg* (Scaled Conjugate Gradient) para el sistema de predicción de emisiones y diagnóstico de fallas mecánicas, el cual presentó un error de $5.4061e^{-9}$.

Así mismo la red neuronal de la emisión HC utiliza la función de entrenamiento *trainscg* (Scaled Conjugate Gradient) para la predicción de emisiones y diagnóstico de fallas mecánicas, la cual presentó un error de $9.7587e^{-5}$.

En la Figura 10 y Figura 11 se presentan los resultados del coeficiente de correlación de Pearson R de la red neuronal de CO y HC, respectivamente, la cual es facilitada por el código de entrenamiento `red.trainFcn='trainscg'` del *software* Matlab.

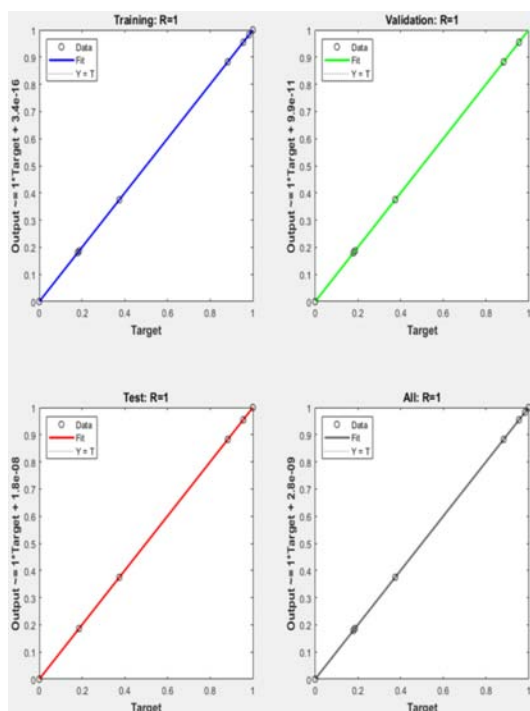


Figura 10. Correlación entre los valores esperados y pronosticados por la red neuronal CO.

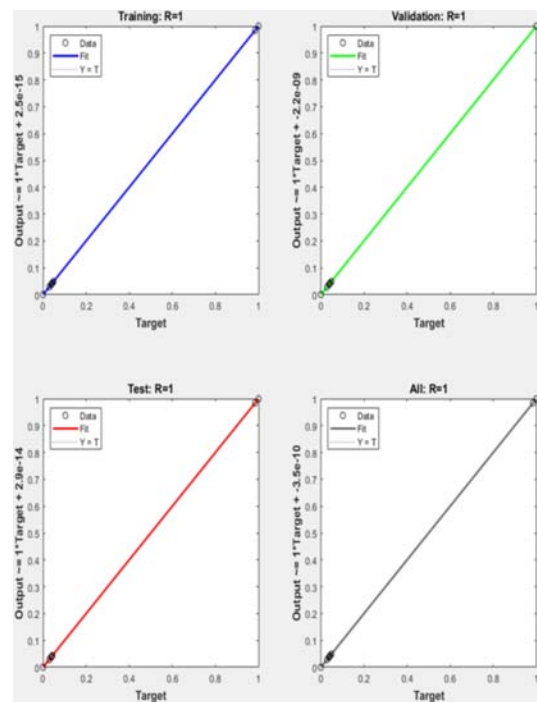


Figura 11. Correlación entre los valores esperados y pronosticados por la red neuronal HC.

Las líneas indican los valores esperados y los círculos negros representan los valores pronosticados por la RNA. La predicción determinada por la red neuronal es eficiente y se corrobora con un buen desempeño, dado que se obtiene un índice global de 1 en entrenamiento, validación y prueba lo que indica una relación lineal fuerte positiva entre las condiciones reales del MEP y los resultados proporcionados por la red neuronal [11].

En las Figuras 12 y 13 se muestra la comparación entre la respuesta de la red neuronal con el resultado esperado, respectivamente de la red CO y red HC; se observan las siete condiciones mecánicas reales del motor identificadas por la red neuronal.

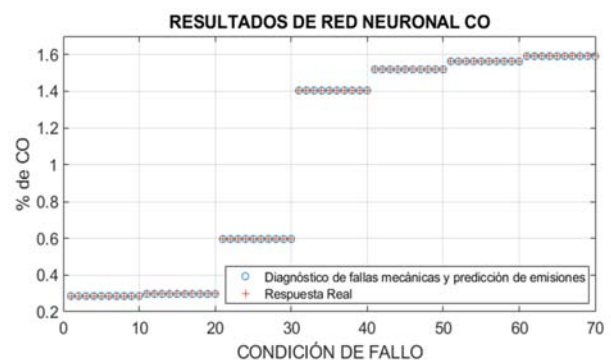


Figura 12. Red neuronal CO con porcentaje de error de $5.4061e^{-9}$, con función de entrenamiento “*trainscg*”.

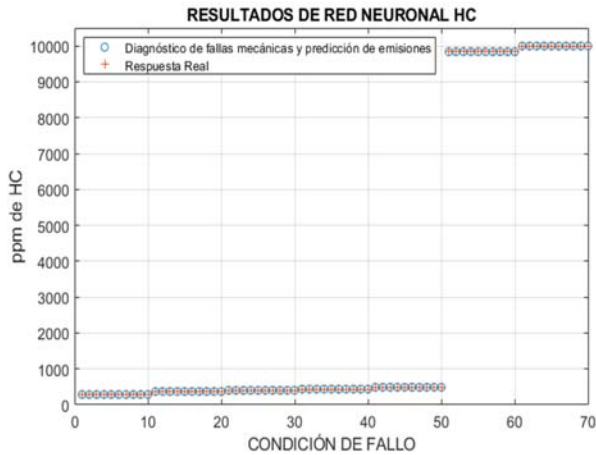


Figura 13. Red neuronal HC con porcentaje de error de $9.7587e^{-5}$, con función de entrenamiento “trainscg”.

3. Resultados y discusión

A fin de comparar el correcto funcionamiento del sistema de predicción de emisiones y diagnóstico de fallas mecánicas se procede a realizar varias pruebas bajo diversas condiciones de funcionamiento.

En este apartado se presentan dos condiciones de falla en específico: el inyector 2 (300) y el fallo en bobina 1-4 (1000).

En la Figura 14 se muestran los resultados de los valores obtenidos por la red neuronal CO para los estados de funcionamiento cuando el inyector 2 se encuentra con falla.

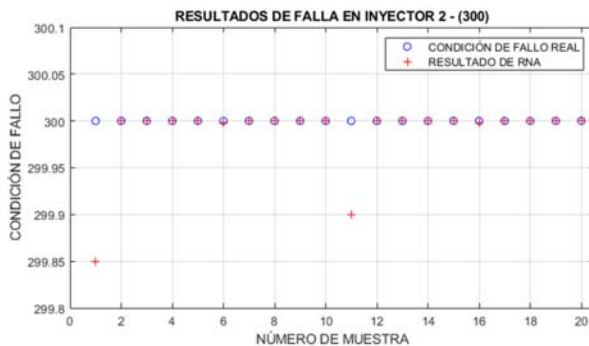


Figura 14. Resultado de condición de funcionamiento de inyector 2.

En la Figura 15 se observan los resultados de los valores obtenidos por la RNA de HC para condiciones de funcionamiento cuando la bobina 1-4 se encuentra con falla.

Obtenidos los resultados de las condiciones funcionales del motor de encendido provocado, se puede resaltar que la diferencia entre las respuestas tanto de condición real y respuesta de red neuronal de CO y HC tienen un valor próximo a cero. Por lo tanto, la

aplicación del sistema de diagnóstico de fallas mecánicas y predicción de emisiones contaminantes es capaz de detectar la condición funcional de falla mecánica y predicción de emisión contaminante.

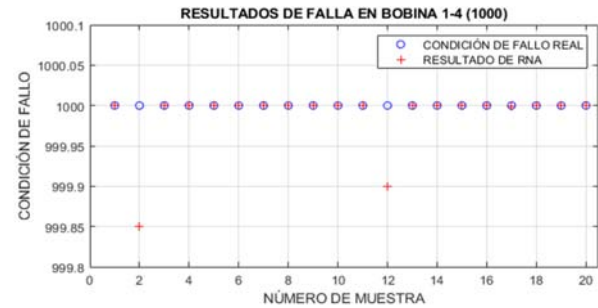


Figura 15. Resultado de condición de funcionamiento de bobina de ignición de alta tensión 1-4.

En efecto en la Figura 16 se observa que al agrupar los datos de condición real del motor y respuesta obtenida de la RNA de CO y en la Figura 17 la del HC, mediante el método estadístico de Tukey con un índice de confianza del 95 %, se determina que las medias son equivalentes y no existe una diferencia estadísticamente significativa, ya que las medias de cada una de las respuestas coinciden en un valor próximo a cero.

Además, las Figuras 18 y 19 de intervalos de la RNA CO y HC, respectivamente, indican que no existe diferencia entre los promedios de las pruebas en las diferentes condiciones funcionales del MEP.

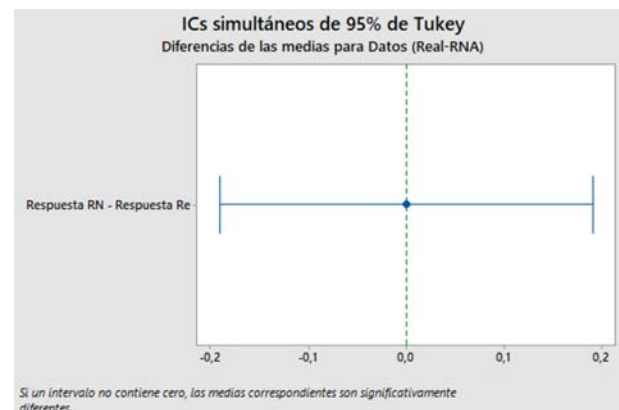


Figura 16. Gráfica de diferencias de las medias para datos de respuesta real vs. red neuronal CO.

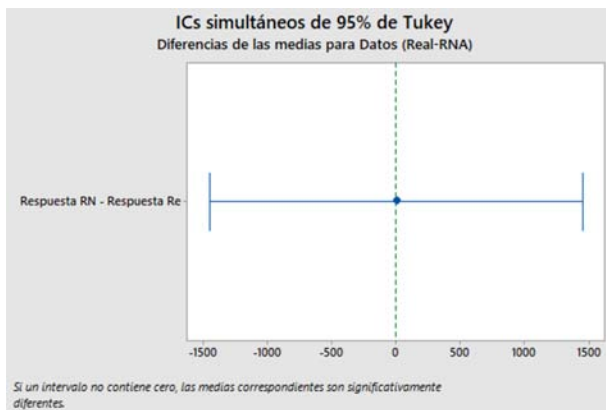


Figura 17. Gráfica de diferencias de las medias para datos de respuesta real vs. red neuronal HC.

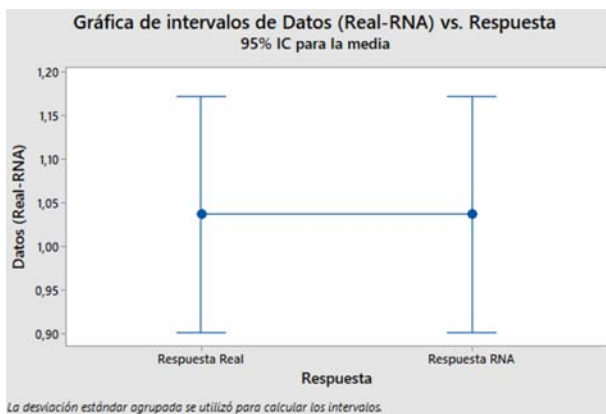


Figura 18. Gráfica de intervalos de datos de respuesta real vs. red neuronal CO.

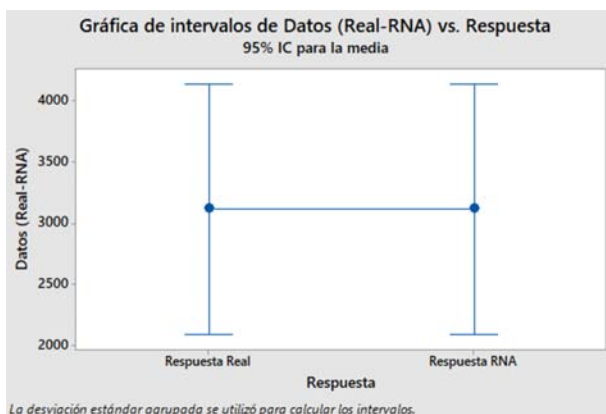


Figura 19. Gráfica de intervalos de datos de respuesta real vs. red neuronal HC.

Así mismo, en las Figuras 20 y 21 se corrobora que existe una relación entre la respuesta real y de la red neuronal ya que comparten la misma letra de agrupación (A) y el valor p ($p\text{-value}$) es igual a 1. Dando como resultado un valor de confiabilidad aproximadamente del 100,00 %, siendo este valor aceptable para

temas de diagnóstico de fallas mecánicas y predicción de emisiones contaminantes de motores de combustión interna de encendido provocado.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Respuesta	1	0,0000	0,000000	0,00	1,000
Error	138	45,1161	0,326928		
Total	139	45,1161			

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Respuesta	N	Media	Agrupación
Respuesta Real	70	1,0367	A
Respuesta RNA	70	1,0367	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 20. Resultados del análisis de varianza y comparaciones en parejas de Tukey de la RNA de CO.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Respuesta	1	0	0	0,00	1,000
Error	138	2590798996	18773906		
Total	139	2590798996			

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Respuesta	N	Media	Agrupación
Respuesta Real	70	3118	A
Respuesta RNA	70	3118	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 21. Resultados del análisis de varianza y comparaciones en parejas de Tukey de la RNA de HC.

4. Conclusiones

Los modelos de redes neuronales para el diagnóstico y predicción de emisiones contaminantes tanto de CO y HC desarrollados posee un error de clasificación de $5.4061e^{-9}$ y $9.7587e^{-5}$, respectivamente.

La función de entrenamiento `trainscg`, permite la identificación precisa de los diferentes tipos de condiciones mecánicas del MEP y predicción de emisiones, por lo que constituye una alternativa viable para ser integrada en un sistema de diagnóstico como escáner automotor o analizador de gases de vehículos a gasolina, debido a la rapidez computacional que ofrecen las redes neuronales artificiales.

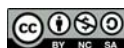
Mediante el desarrollo del análisis de varianza de un solo factor, se obtuvo un valor de p ($p\text{-value}=1,00$) demostrando que la respuesta real de clasificación de fallas mecánicas y predicción de emisiones es equivalente al resultado obtenido mediante las redes neuronales desarrolladas, de manera que con este valor se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa.

En este trabajo se muestra que la aplicación de redes neuronales (*feed-forward backpropagation*) es válida para la detección de condiciones de fallas mecánicas como también para la predicción de emisiones contaminantes de vehículos a gasolina, además, la técnica de diagnóstico aplicada presenta la ventaja de evitar el desensamble de elementos y sistemas del motor con una técnica mínimamente invasiva fiable y de gran precisión.

Los resultados muestran que las redes neuronales (*feed-forward backpropagation*) con 160 o 250 neuronas ocultas y entrenando con la función trainsecg (*Scaled Conjugate Gradient*), puede lograrse un error promedio $4.87962e^{-5}$, lo que demuestra que las emisiones de vehículos a gasolina se pueden predecir con alta precisión.

Referencias

- [1] F. Ballester, "Contaminación atmosférica, cambio climático y salud," *Revista Española de Salud Pública*, vol. 79, pp. 159–175, 04 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/2piHMQZ>
- [2] A. Restrepo, S. Izquierdo, and R. López, "Estimación de factores que inciden sobre la contaminación ambiental generada por fuentes móviles en pereira," *Scientia et technica*, vol. 1, no. 37, pp. 267–272, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.4053>
- [3] X. Li, D. Sun, G. Lu, J. Krabicka, and Y. Yan, "Prediction of nox emissions through flame radical imaging and neural network based soft computing," in *2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings*, July 2012, pp. 502–505. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IST.2012.6295594>
- [4] M. Cortina, "Aplicación de técnicas de inteligencia artificial a la predicción de contaminantes atmosféricos," Ph.D. dissertation, 2012.
- [5] J. D. Martínez-Morales, E. R. Palacios-Hernández, and G. A. Velázquez-Carrillo, "Modeling and multi-objective optimization of a gasoline engine using neural networks and evolutionary algorithms," *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 14, no. 9, pp. 657–670, Sep 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1300010>
- [6] T. Fontes, L. M. Silva, S. R. Pereira, and M. C. Coelho, "Application of artificial neural networks to predict the impact of traffic emissions on human health," in *Progress in Artificial Intelligence*, L. Correia, L. P. Reis, and J. Cascalho, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 21–29. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-40669-0_3
- [7] J. D. Martínez-Morales, E. R. Palacios-Hernández, and G. A. Velázquez-Carrillo, "Artificial neural network based on genetic algorithm for emissions prediction of a si gasoline engine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 2417–2427, Jun 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0535-2>
- [8] T. López Ortiz and A. Pacheco González, "Efectos de la contaminación atmosférica en la salud de las personas en la ciudad de cuenca," 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/32M8jnz>
- [9] J. Guadalupe Almeida, "Modelación de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres en Quito, Ecuador," 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/2qdvTG8>
- [10] P. León Bacuilima and C. Piña Orellana, "Predicción de emisiones contaminantes de gases de escape a través de la presión media efectiva empleando redes neuronales en motores de encendido provocado, cuenca," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2q2oTIT>
- [11] W. Contreras, J. Maldonado, and R. León, "Aplicación de una red neuronal feed-forward backpropagation para el diagnóstico de fallas mecánicas en motores de encendido provocado," *INGENIUS*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.03>



EFECTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BAÑO EN LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE ZINC POR INMERSIÓN EN CALIENTE: UNA REVISIÓN

EFFECT OF CHEMICAL BATH COMPOSITION ON MICROSTRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE OF ZINC COATINGS BY HOT DIP: A REVIEW

Jeanette Hernández^{1,*}, Maribel Suárez²

Resumen

Los recubrimientos metálicos son métodos ampliamente utilizados para la protección contra la corrosión de aleaciones metálicas, siendo el proceso de cincado por inmersión en caliente uno de los que presenta mayor evolución a nivel industrial. El objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica sobre la influencia de la adición de elementos aleantes en el baño, en la microestructura y en el comportamiento a la corrosión de recubrimientos de zinc obtenidos por la técnica de inmersión en caliente. Se estableció que la composición química de los baños galvanizados influye en las características microestructurales de los recubrimientos y en su comportamiento a la corrosión. La mejora de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc se produce por la adición a los baños de elementos generalmente más activos que el zinc, tales como el magnesio o el aluminio que permiten la formación de capas pasivas que retardan el proceso corrosivo.

Palabras clave: zinc, corrosión, microestructura, recubrimiento, galvanizado, inmersión en caliente.

Abstract

Metal coatings are widely used methods for corrosion protection of metal alloys, the hot dip galvanizing process being one of the most industrially evolved. The objective of this work is to carry out a literature review, on the influence of the addition of alloying elements in the bathroom, on the microstructure and on the corrosion behavior of zinc coatings obtained by hot dipping technique. It was determined that the chemical composition of the galvanized baths influences the microstructural characteristics of the coatings and their corrosion behavior. The improvement of the corrosion resistance of zinc coatings is produced by the addition to the baths of elements generally more active than zinc, such as magnesium or aluminum that allow the formation of passive layers that retard the corrosive process.

Keywords: Zinc, Corrosion, Microstructure, Coating, Galvanized, hot dip.

^{1,*}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice Rectorado Barquisimeto – Venezuela. Autor para correspondencia ✉: jeanette_hernandez2000@yahoo.com, jphernandez@unexpo.edu.ve <http://orcid.org/0000-0002-8359-1058>

²Escuela de Ingeniería Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela. <http://orcid.org/0000-0003-0449-0417>

Recibido: 21-09-2019, aprobado tras revisión: 08-11-2019

Forma sugerida de citación: Hernández, J. y Suárez, M. (2020). «Efecto de la composición química del baño en la microestructura y resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente: Una revisión». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 40-52. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.04>.

1. Introducción

Los procesos para obtener recubrimientos mediante tecnologías de inmersión en caliente y en particular los de zinc puro, se vienen usando como protección contra la corrosión ante diferentes ambientes, especialmente urbanos, en los que su comportamiento resulta muy satisfactorio en términos generales. Sin embargo, en ambientes marinos, en los que la humedad y la concentración de cloruro de sodio suelen ser elevados, la resistencia a la corrosión de los aceros recubiertos con zinc puro puede disminuir sensiblemente [1].

Algunas propuestas de solución a esta limitación incluyen la generación de recubrimientos base zinc con la adición de algunos elementos aleantes, siendo los más estudiados el aluminio, el magnesio, el silicio, el cobre, el estaño, el níquel y otros elementos en menor proporción [1, 2].

Desde un punto de vista tecnológico, los parámetros operacionales para efectuar el proceso de recubrimiento de zinc sobre el acero por la técnica de inmersión en caliente se han mantenido prácticamente invariables con el tiempo, pero las nuevas aplicaciones en la industria automotriz y en la construcción han originado que, en la actualidad, exista una cantidad considerable de trabajos de investigación acerca de los aspectos del proceso y de nuevos tipos de recubrimientos de zinc [3, 4], lo cual ha aumentado los estudios de la influencia de agregar elementos aleantes al baño de zinc, la microestructura y las propiedades de los recubrimientos obtenidos [3, 4].

En vista de lo anterior, este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica, sobre la influencia de la adición de elementos aleantes en el baño, en la microestructura y en el comportamiento a la corrosión de recubrimientos de zinc obtenidos por la técnica de inmersión en caliente.

2. Desarrollo de recubrimientos de zinc sobre acero

La Asociación Americana de Galvanizadores [5] indica que la historia registrada de la galvanización se remonta al año 1742 cuando el químico francés llamado Melouin, en una presentación ante la Academia Francesa Royal, describe un método de recubrimiento de hierro por inmersión en zinc líquido.

En el año 1836, Sorel, otro químico francés, obtuvo una patente para fabricar un recubrimiento de zinc sobre hierro, después de efectuar una limpieza con 9 % de ácido sulfúrico y usando un fundente con cloruro de amonio.

Para el año 1850, la industria británica de galvanizado utilizaba 10 000 toneladas de zinc al año para la protección del acero y en 1870, se instaló la primera planta de galvanizado en los Estados Unidos.

Los recubrimientos obtenidos por la técnica de galvanizado, son ampliamente utilizados en diversas industrias. Las empresas de servicios públicos, procesos químicos, pulpa y papel, industria automotriz y transporte, históricamente han hecho un uso extensivo de la galvanización para el control de la corrosión, y siguen haciéndolo hoy en día. Durante más de 150 años, la galvanización ha tenido una probada historia de éxito comercial como un método de protección a la corrosión en una gran variedad de aplicaciones en todo el mundo. Las investigaciones en los últimos años, indican que los estudios se han centrado en la influencia de la composición química del baño en la microestructura y las propiedades de los recubrimientos galvanizados. Los cambios en la composición química de los baños de zinc buscan, sin duda alguna una mejora significativa en las propiedades del recubrimiento galvanizado, bien sea, en la resistencia a la corrosión, en los procesos de soldabilidad, y/o en las propiedades mecánicas del mismo.

En la Figura 1, se presenta un recubrimiento típico de acero galvanizado, donde se puede observar tres capas bien definidas, las cuales se forman durante el proceso de galvanizado, cada capa corresponde a la formación de productos intermetálicos y de acuerdo con su composición se conocen como Gamma, Delta y Zeta y la capa superior de zinc puro Eta. Durante el proceso de galvanización, las capas se desarrollan naturalmente durante una reacción metalúrgica entre el hierro del acero y el zinc del baño [5].

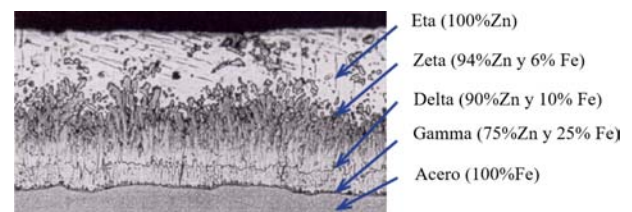


Figura 1. Microestructura de un recubrimiento típico de Zn mostrando las capas formadas con su respectiva composición química. [5]

Las investigaciones se han orientado a estudiar la metalurgia del acero galvanizado desde un punto de vista científico para desarrollar relaciones a las aplicaciones prácticas. Estos estudios involucran la evaluación sistemática del proceso de inmersión en caliente, junto con los diagramas de equilibrio o de fases Fe-Zn y la cinética de formación de las capas del recubrimiento de Zn [3].

Cabe destacar, que el aluminio es uno de los elementos más utilizados en el baño de zinc. El desarrollo comercial de estos recubrimientos, tales como el Galvalume®(Zn-55Al) en 1970 y del Galfan® (Zn-5Al) durante 1980, demostraron con éxito que la incorporación del aluminio mejora significativamente la resistencia a la corrosión del recubrimiento base zinc.

Desde entonces se han efectuado numerosas investigaciones acerca de los recubrimientos Zn-Al aplicados por inmersión en caliente sobre el acero.

El Galvalume®, es un recubrimiento de aproximadamente 55 % de aluminio que contiene aproximadamente 1,5 % de silicio, el cual es añadido con el propósito de prevenir una reacción exotérmica en la intercara recubrimiento / sustrato de acero. Durante el proceso se generan en la intercara, compuestos intermetálicos Fe-Zn-Al. La superficie del Galvalume® contiene características de lentejuelas, que consisten en dendritas de aluminio con distancia del brazo dendrítico claramente medibles.

El Galfan® es un recubrimiento de zinc con 5 % de aluminio, que está cerca del punto eutéctico, tienen una excelente conformabilidad y protección a la corrosión. Dos composiciones se han reportado sobre la base de adiciones a la composición eutéctica: pequeñas adiciones que contiene lantano y cerio hasta alrededor del 0,5 % y adiciones de 0,5 % de magnesio. Estas adiciones, se hacen para mejorar la humectabilidad o mojabilidad del baño fundido sin reducir la resistencia a la corrosión del recubrimiento. La microestructura del Galfan® se caracteriza por una estructura bifásica, la fase proeutectoide η rica en zinc rodeada por una fase de tipo eutéctica formada por beta (β) y eta (η). Sin embargo, la microestructura puede variar dependiendo de velocidad de enfriamiento [3].

En la Figura 2 se observa este último efecto, donde Rico y Hernández [6] estudiaron la influencia de la velocidad de enfriamiento en la morfología y distribución de las fases de los recubrimientos Zn-7Al sobre acero. La microestructura del recubrimiento enfriado en agua muestra la mezcla eutéctica segregada en la intercara recubrimiento/acero, y los enfriados dentro del horno, presentan un microconstituyente monotectoide de morfología dendrítica.

Según el ASM Handbook: Corrosion [7] hay buena evidencia de que pequeñas cantidades de elementos de aleación pueden afectar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos galvanizados. Los mecanismos para estos efectos son complejos y no se entienden completamente, pero la literatura sugiere que los elementos de aleación se segregan a los límites de grano, donde pueden acelerar o retardar el ataque intergranular. Considerando, la aleación Zn/0,1-0,2Al, típicamente utilizada para galvanizado en caliente, se encontró que el agregado en el baño de magnesio y cobre reduce el mecanismo de corrosión intergranular, mientras que la presencia de bismuto, cadmio, plomo y estaño aumenta el ataque localizado. También hay algunas evidencias de que la adición de níquel al baño reduce la reacción de evolución de hidrógeno, y aumenta la resistencia a la corrosión en ambientes que contengan cloruros [8,9].

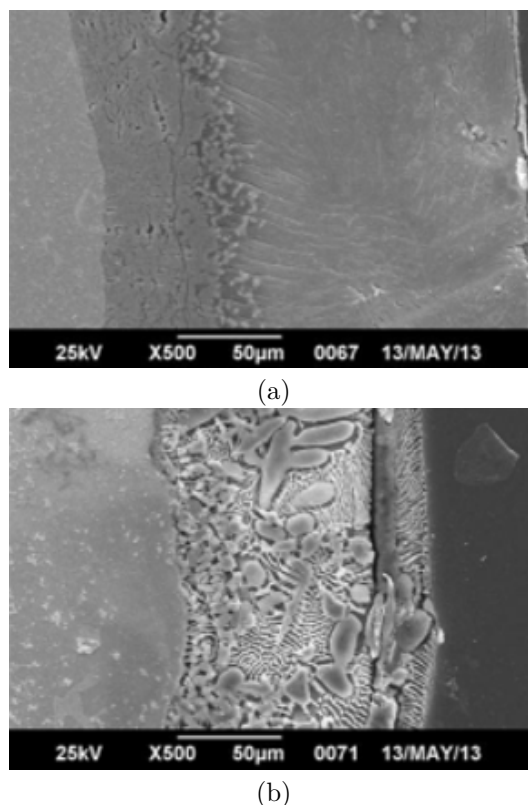


Figura 2. Micrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB) de recubrimientos Zn-7Al, con diferentes condiciones de enfriamiento. A) agua. B) horno [6].

Recientemente, los estudios sobre los recubrimientos de Zn-Al-Mg han llamado la atención. La razón de su estudio sistemático masivo es su rendimiento en medios o ambientes salinos donde se han obtenido mejores comportamientos a la corrosión del orden de 10 a 20 veces respecto al recubrimiento de Zn y de 2 a 5 respecto a los de Zn-Al. También se han encontrado otras propiedades importantes tal como la capacidad de autocuración, por lo que el área de la incisión puede volver a cerrarse y protegerse, resistencia al rayado y al desgaste, densidad del recubrimiento más ligero, entre otras ventajas [10].

Compañías japonesas, europeas y sudafricanas ya han desarrollado recubrimientos Zn-Al-Mg, tal como la Nisshin Steel Co, que ha patentado la marca ZAM®. Sin embargo, aún falta información detallada sobre el mecanismo anticorrosivo del recubrimiento de Zn-Mg-Al en la literatura abierta, y se sabe muy poco específicamente sobre el rendimiento electroquímico del recubrimiento de Zn-Al-Mg. Por otra parte, no se han optimizado las condiciones de operación del proceso de inmersión en caliente de tal forma de obtener una superficie lisa del recubrimiento Zn-Al-Mg, siendo un desafío en este campo [10].

Li *et al.* [2] evaluaron un recubrimiento sobre acero de aleación Zn-5Al-0,5Mg-0,08Si y fue comparado con el recubrimiento Zn-5Al. Encontraron que la resis-

cia a la corrosión del recubrimiento Zn-5Al no es muy alta en comparación con el que contiene magnesio y silicio.

En la Figura 3 se muestra la morfología de la superficie del recubrimiento, de Zn-5Al y los resultados correspondientes a la composición química en los puntos A y B. El recubrimiento consiste en β (Zn) grueso y fases eutécticas binarias de Zn-Al.

Debido a la diferencia de potencial entre las dos fases (Figura 3), cuando se coloca el recubrimiento en el ambiente corrosivo, la fase de potencial más electronegativo acelerará el proceso de corrosión, mientras que la fase de potencial menos electronegativo estará protegida de corroerse.

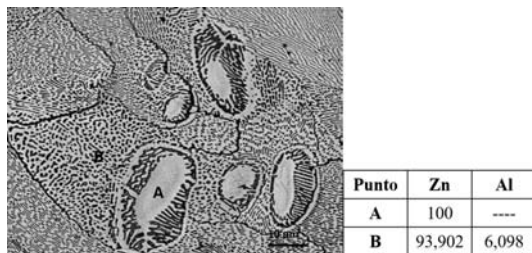


Figura 3. Micrografía por microscopía electrónica de barrido (MEB) de un recubrimiento de Zn-5Al y la composición química en porcentaje en peso por espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDS) en los puntos A y B. [2]

La Figura 4 indica la imagen por microscopía electrónica de barrido (MEB) de un recubrimiento de Zn-5Al-0,5Mg-0,08Si. Se puede ver que la separación del brazo dendrítico de Zn-5Al del recubrimiento se reduce significativamente de $\sim 10 \mu\text{m}$ a $2\text{--}5 \mu\text{m}$, después de agregar elementos de aleación Mg y Si. Se forman las fases β (Zn) (A), otra rica en Al (B) y un eutéctico terciario $\text{MgZn}_2\text{-Zn-Al}$ (C) [2]. El magnesio es solo distribuido en los límites de granos, y esto puede hacer que los granos sean más finos e impedir la corrosión intergranular.

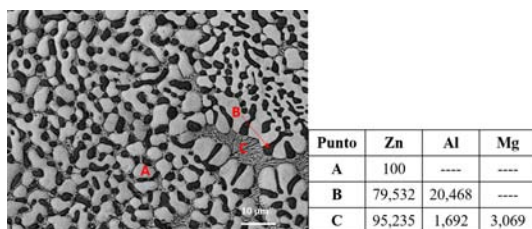


Figura 4. Micrografía por microscopía electrónica de barrido (MEB) de un recubrimiento de Zn-5Al-0,5Mg-0,08Si y la composición química en porcentaje en peso por espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDS) en los puntos A y B. [2]

En este mismo sentido, Schuerz *et al.* [11], efectuaron un estudio sobre chapas de acero recubiertas convencionalmente por inmersión en caliente de Zn (Z)

y de aleación Zn-Al-Mg (ZM), con una composición química que se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de los recubrimientos evaluados en porcentaje en peso [11]

Recubrimiento	Zn	Al	Mg
Z	99,8	0,2	----
ZM	96	2	2

La microestructura de los recubrimientos convencionales de zinc (Z) y cinc-aluminio-magnesio (ZM) difieren considerablemente como se ilustra en la Figura 5.

El recubrimiento Z consiste en una capa de material homogéneo de zinc puro. El aluminio está enriquecido en la intercara acero/recubrimiento en forma de una capa muy delgada de un compuesto intermetálico Al-Fe, lo que asegura una correcta adherencia del recubrimiento sobre la superficie de acero. Por otro lado, el recubrimiento ZM consta de diferentes fases: una fase de zinc, que también incluye pequeñas cantidades de aluminio, una fase de aluminio y la fase de MgZn_2 . Este último y el zinc también se presentan en forma de eutéctico binario (marcado con un rectángulo), así como un eutéctico terciario de zinc, aluminio y la fase MgZn_2 (marcado con un marco óvalo).

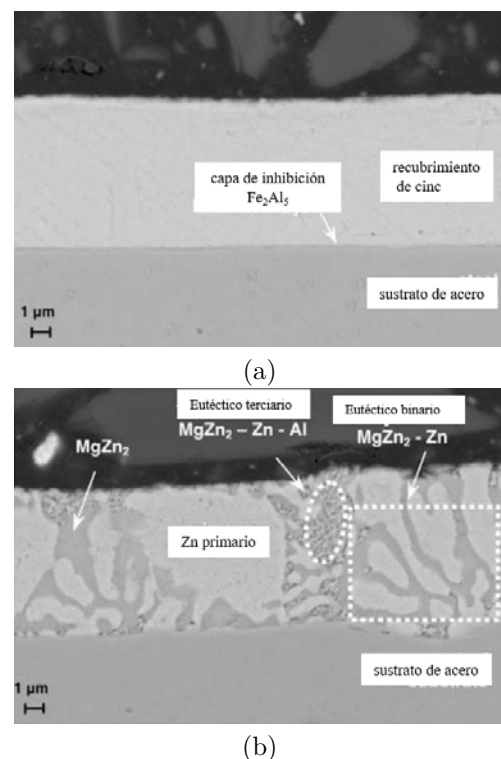


Figura 5. Micrografía por microscopía electrónica de barrido (MEB) de un recubrimiento de Zn convencional Z (a) y de un recubrimiento de aleación Zn-Al-Mg ZM (b). [11]

El recubrimiento metálico ZM se convierte en un material estable, adherente y una capa de óxido rica en aluminio que protege el sustrato de acero en ambientes corrosivos. Esta capa es la razón principal de la resistencia a la corrosión mejorada del recubrimiento ZM en un entorno que contiene cloruro de sodio.

Otros desarrollos que han surgido como innovación de los procesos de cincado por inmersión caliente son los procesos de doble inmersión, los cuales se plantearon basándose en los problemas operacionales que presentan durante la inmersión en caliente los recubrimientos Zn-Al, ya que no tienen buena compatibilidad con los sistemas típicos de flux y el utilizar otros no lo hace práctico en la industria de la galvanización. Además de que la cantidad de aluminio que entra en la capa del recubrimiento representa un problema adicional en la composición del baño, ya que se reduce considerablemente la concentración de aluminio, lo que genera un continuo monitoreo [4].

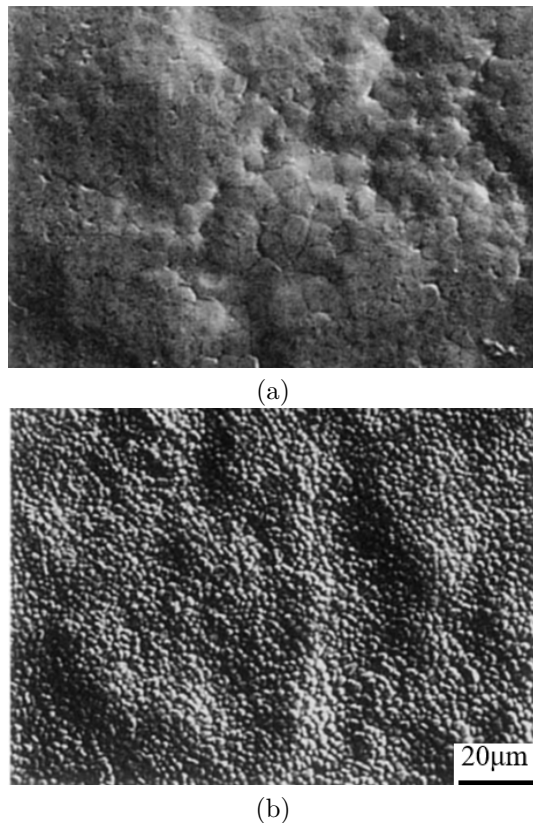


Figura 6. Morfología superficial por MEB de los recubrimientos formados sobre aceros de bajo carbono por inmersión en caliente en dos etapas Z6A (a) y Z6AMS (b). [12]

En este sentido, Tanaka *et al.* [12] evaluaron recubrimientos sobre acero con bajo contenido de carbono por inmersión en caliente en dos etapas (doble inmersión), principalmente en un baño de Zn y luego en un baño de Zn-6Al (Z6A) con o sin adición de 0,5 % en peso de Mg y 0,1 % en peso de Si (Z6AMS). En

la Figura 6 se muestra la morfología de la superficie de los recubrimientos formados por la inmersión en caliente de dos etapas con baños secundarios de Z6A (a) y Z6AMS (b). La superficie del revestimiento formado en el Z6AMS mostró granos muy finos y pocos defectos en comparación con el Z6A.

Las capas de recubrimiento consistían en una estructura dúplex; una capa externa y una capa interna de aleación (Figura 7). Identificaron que la capa de aleación interna estaba compuesta principalmente de una fase intermetálica de $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ -Zn. Observaron que los cristales de esta fase son distribuidos aleatoriamente en el recubrimiento Z6A, mientras que el recubrimiento Z6AMS tiene una estructura columnar con crecimiento perpendicular al sustrato de acero.

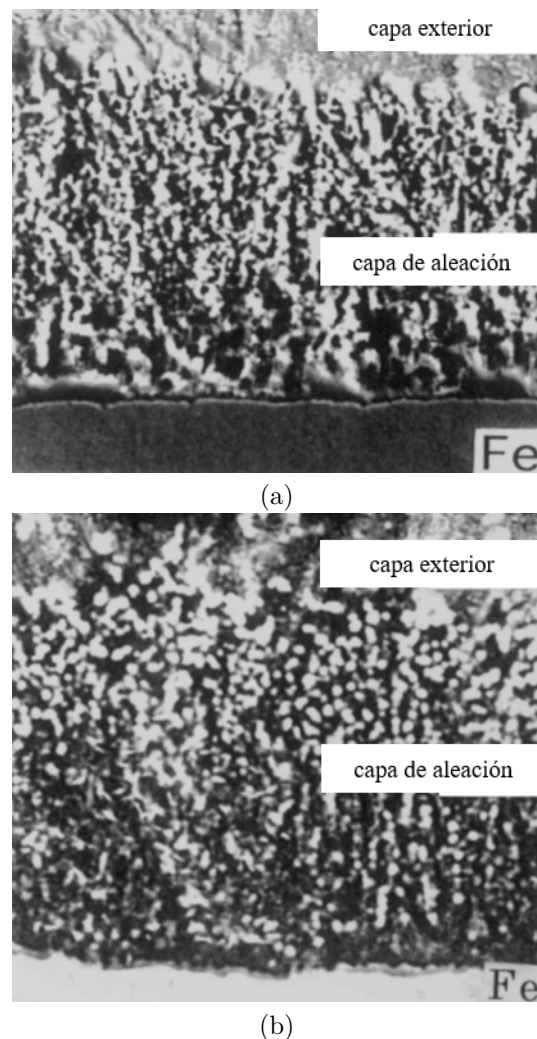


Figura 7. Microestructuras de las secciones transversales de los recubrimientos Z6A (a) y Z6AMS (b). [12]

Las Figuras 8 (a) y (b) muestran la capa externa para los recubrimientos Z6A y Z6AMS, respectivamente. El área oscura es principalmente una fase α -Al y el área clara es la estructura de un eutéctico de Zn (Al) y α -Al. Se encontró que el α -Al en el recubri-

miento Z6A en la Figura 8 (a) era mucho más grueso que el del recubrimiento Z6AMS en la Figura 8 (b). El recubrimiento Z6AMS se corroyó lentamente y de forma homogénea, mientras que el recubrimiento de Z6A se degrada localmente debido a una corrosión preferencial a lo largo de defectos. El recubrimiento Z6AMS presenta Mg y Si en la capa externa y Si en la capa de aleación interna, lo cual lo hace más anticorrosivo.

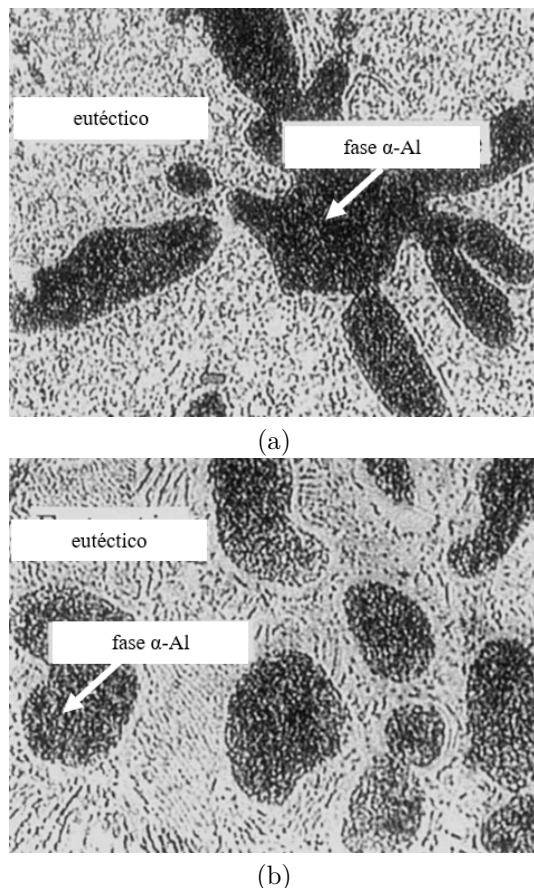


Figura 8. Microestructuras de la capa externa de los recubrimientos Z6A (a) y Z6AMS (b). [12]

En los procesos de doble inmersión también se destaca el estudio efectuado por Tachibana y colaboradores [13], donde se evaluó un nuevo recubrimiento por inmersión en caliente de Zn_7Al sobre un acero estructural el cual fue aplicado mediante una doble capa $Zn-Zn_7Al$, para evitar la corrosión severa en las zonas costeras. El recubrimiento doble fue significativamente eficaz en la prevención de la corrosión, particularmente en la orilla del mar. Se estimó que la vida del recubrimiento $Zn-Zn_7Al$ sobre el acero fue cuatro veces la del acero recubierto con Zn en la orilla del mar. Se reveló que la excelente adhesividad del doble revestimiento $Zn-Zn_7Al$ sobre el acero fue debido a la formación de la región de intercara que consta de una fase heterogénea fina de una mezcla de cinc, aluminio y hierro.

También Rico y Carrasquero [8] realizaron una caracterización microestructural de recubrimientos de zinc por el método de doble inmersión sobre acero. La temperatura del baño de inmersión fue de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los recubrimientos se realizaron usando diferentes tiempos de inmersión. Todos los recubrimientos mostraron tres zonas definidas. La primera zona, que corresponde a la interfaz acero/revestimiento, presenta propiedades típicas de un proceso de galvanización tradicional a altas temperaturas. En la zona II, se observó una microestructura muy heterogénea; la zona III mostró una matriz de $Zn-Fe$ con partículas de compuestos de $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$, tal como se observa en la Figura 9. Las propiedades microestructurales de los recubrimientos fueron similares durante los tres tiempos de inmersión. Determinaron la presencia de Fe y Al en todo el recubrimiento, debido a la difusión del hierro del metal base y el aluminio que presenta el segundo baño de inmersión.

Así se tiene, que el desarrollo de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente se ha basado en modificar la composición química del baño, lo cual implica cambios microestructurales que mejoran sus propiedades para una aplicación específica. Los elementos de aleación que más se han estudiado con el fin de establecer su influencia en las propiedades generales de estos recubrimientos son el aluminio [3, 6, 13–17], el magnesio [2, 10–12, 16–19] y el silicio [2]. Otros elementos que en menor proporción se han estudiado son el cobre [1, 20], el titanio, el níquel [21, 22], etc.

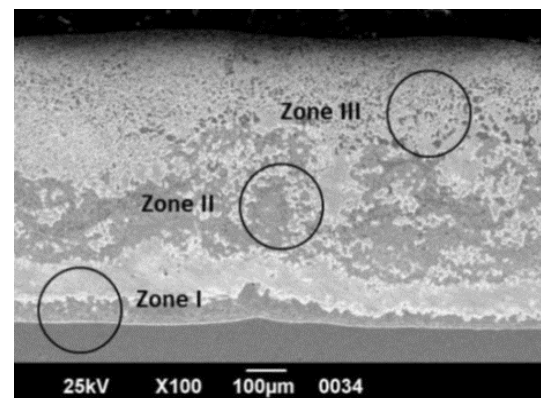


Figura 9. Micrografía MEB del recubrimiento de $Zn/Zn-5Al$, con un tiempo de inmersión total de 120 s, donde se muestran las tres zonas del recubrimiento. [8]

3. Comportamiento a la corrosión de los recubrimientos de zinc

Los recubrimientos de zinc añaden resistencia a la corrosión al acero de varias maneras; una como una capa barrera, ya que el recubrimiento continuo separa el acero del ambiente corrosivo; otra por protección galvánica, ya que el zinc actúa como un ánodo de

sacrificio que protege el acero en áreas adyacentes a los huecos, rasguños y bordes del recubrimiento. El comportamiento del zinc se puede ver en una serie galvánica donde el zinc es menos noble que el acero en la mayoría de los medios a temperatura ambiente [3].

Una capa superficial porosa de óxido de zinc se forma en la superficie por un mecanismo de disolución/reprecipitación, lo que conduce a vías de corrosión preferenciales en el área de alta porosidad o discontinuidades, lo que explica la tasa de corrosión lineal. Además, después de la disolución del zinc metálico, el hidróxido de zinc puede precipitar a las áreas catódicas del acero expuesto, formando una capa barrera secundaria. Por lo que el recubrimiento de zinc se corroerá a una velocidad más lenta que el sustrato de acero, aunque la tasa de corrosión del zinc variará dependiendo del ambiente de exposición [3].

En el caso de recubrimientos Zn-Al como el Galfan®, la corrosión en ambientes no marinos ocurre en dos etapas: protección temporal por formación de capa pasiva de óxido de aluminio y la acción galvánica del zinc donde se forma sulfato de zinc sobre la capa de óxido. La cinética es controlada por la segunda etapa por la necesidad de difundir a través de la capa de óxido, lo cual explica la disminución de la velocidad de corrosión del Galfan® respecto a los recubrimientos de zinc convencionales. También se ha demostrado que la fase rica en zinc (η -eta) se corroe preferencialmente respecto al proeutéctico y eutéctico. Las adiciones de Mg (hasta 0,8 % en peso) aumentan la cantidad de proeutéctico de fase Al, lo cual mejora la resistencia a la corrosión. El Galfan® se corroe de forma parabólica mientras los recubrimientos convencionales se corroen en forma lineal [3].

La corrosión atmosférica del recubrimiento Galvalume® se lleva a cabo en las regiones interdendríticas ricas en zinc, lo que permite una protección galvánica. Luego los productos de corrosión quedan atrapados en esos espacios y actúan como una barrera a la corrosión. El proceso corrosivo es del tipo parabólico [3].

En vista de la importancia de evaluar sistemáticamente el comportamiento a la corrosión de estos recubrimientos en diferentes ambientes, múltiples investigadores se han abocado a realizar ensayos de corrosión acelerados, los tradicionales de exposición a condiciones atmosféricas, por inmersión y en cámara de niebla salina para conocer la velocidad de corrosión, así como las técnicas electroquímicas que permiten conocer mayor información sobre el mecanismo y la cinética de la corrosión. Estos estudios normalmente se efectúan de manera comparativa para los diferentes recubrimientos, de forma de establecer analogías y diferencias que permitan a la industria decidir sobre la aplicabilidad de cada uno de los recubrimientos evaluados.

En la Tabla 2 se observa un resumen de las técnicas

utilizadas y los ambientes en los cuales generalmente son evaluados los diferentes recubrimientos base zinc.

Por otra parte, el estudio del comportamiento a la corrosión de los recubrimientos de zinc depende de muchos factores, pero la orientación más común de las investigaciones es relacionar los cambios microestructurales de los recubrimientos con su resistencia a la corrosión, por lo cual el añadir elementos aleantes a los baños de zinc tradicionales permiten obtener esos cambios. También en estas investigaciones se torna importante establecer los mecanismos que rigen los procesos corrosivos, basados en técnicas que permiten la caracterización de los productos de corrosión, para relacionarlas con las especies presentes en el ambiente y los elementos que conforma el material [9,15,18,19,23,24].

En este sentido, Hosking *et al.* [25] investigaron acerca del comportamiento a la corrosión de los recubrimientos Zn-Mg en comparación con recubrimientos convencionales de zinc. Para ello siguieron un programa experimental donde efectuaron ensayos de corrosión en una solución acidificada de NaCl, caracterizaron los productos de corrosión y establecieron una propuesta del mecanismo del proceso corrosivo. Los resultados revelaron un aumento de tres veces la resistencia a la corrosión de los recubrimientos Zn-Mg respecto a los convencionales de zinc; así como que la causa de esta mejora es la precipitación de simonkolleita ($\text{Zn}_5\text{Cl}_2(\text{OH})_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$) insoluble posiblemente modificada con magnesio absorbido, hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y una especie de hidroxycarbonato, sobre la superficie corrosiva, retardando así las reacciones de corrosión.

Asimismo, Yao *et al.* [10] evaluaron el comportamiento a la corrosión comparativamente de tres tipos de recubrimientos de zinc con diferentes combinaciones de Zn, Al, Mg y Cu (Zn-0,1 Cu (G), Zn-5Al-0,1Cu (ZA) y Zn-5Al-1Mg-0,1Cu (ZAM)). Realizaron pruebas de cámara de niebla salina y electroquímicas en una solución acuosa de 5 y 3,5 % de NaCl, respectivamente, para acceder al comportamiento de corrosión de los recubrimientos.

En la Figura [12] (a) y (b) se observan las curvas de polarización de los recubrimientos, preparados superficialmente y después de cinco días de ensayos en la cámara de niebla salina, respectivamente. Se observaron algunos cambios en los parámetros del proceso de corrosión. El recubrimiento ZAM en la curva de polarización mostró una región, en el rango de $-1,2$ V a $-1,5$ V (Figura 9b), que mantiene la densidad de corriente relativamente constante independientemente de la variación de potencial, lo que indica que la reacción catódica del recubrimiento ZAM se inhibió en este rango de potencial, debido a la precipitación de productos de corrosión en el área catódica, que actúan como inhibidores, aumentando la impedancia de la superficie del recubrimiento.

Tabla 2. Técnicas y ambientes para evaluar el comportamiento a la corrosión de los recubrimientos zinc

Tipo de recubrimiento	Ambiente corrosivo	Técnica de evaluación	Ref.
Zn Zn-4,9Al	5 % NaCl en laboratorio 3 % NaCl en laboratorio	Cámara niebla salina Polarización Potenciodinámica	[26]
Zn-5Al Zn-55Al	Agua de Mar Real (78 % NaCl) Agua de mar sintética (68 % NaCl)	Mediciones de potenciales	[27]
Zn Zn-5Al	3 % NaCl en laboratorio	Cámara niebla salina Polarización Potenciodinámica	[28]
Zn-0,2Al Zn-2Al-2Mg	5 % NaCl en laboratorio	Cámara niebla salina	[11]
Zn Zn-5Al Zn-55Al	Atmosférica en campo	Ensayos de campo	[29]
Zn Zn-55Al	Atmosférica de campo Cámara Neblina Salina y de SO ₂ en laboratorio	Espectroscopía de impedancia electroquímica	[30]
Zn-55Al	0,5 M NaCl 0,5 M Na ₂ SO ₄ 0,5 M NaClO ₄	Espectroscopía de impedancia electroquímica	[31]
Zn Zn-5Al	5 % solución amoniacal	Ensayo corrosión cíclica	[32]
Zn/Zn-6Al Zn/Zn-6Al-0,5Mg-0,1Si	5 % NaCl en laboratorio	Inmersión	[12]
Zn Zn/Zn-7A	Agua de mar real	Inmersión	[13]

La Figura 11 (a) y (b) muestra los espectros EIS para los recubrimientos G, ZA y ZAM. Las formas de los gráficos de Nyquist (a) y los diagramas de ángulo de fase de Bode (b) de los tres recubrimientos son similares. Las gráficas de Nyquist consisten en un semicírculo a alta frecuencia y un círculo a baja frecuencia. Los diagramas de ángulo de fase de Bode exhiben dos crestas de onda, lo que indica que los

tres recubrimientos pueden tener mecanismos de corrosión similares. Mientras que el recubrimiento ZA tiene una mayor impedancia principalmente en el rango de alta frecuencia (10 Hz ~ 100000 Hz) que los otros dos recubrimientos, el recubrimiento G tiene una impedancia relativamente más alta a baja frecuencia (0.01 Hz ~ 10 Hz) que los recubrimientos ZA y ZAM.

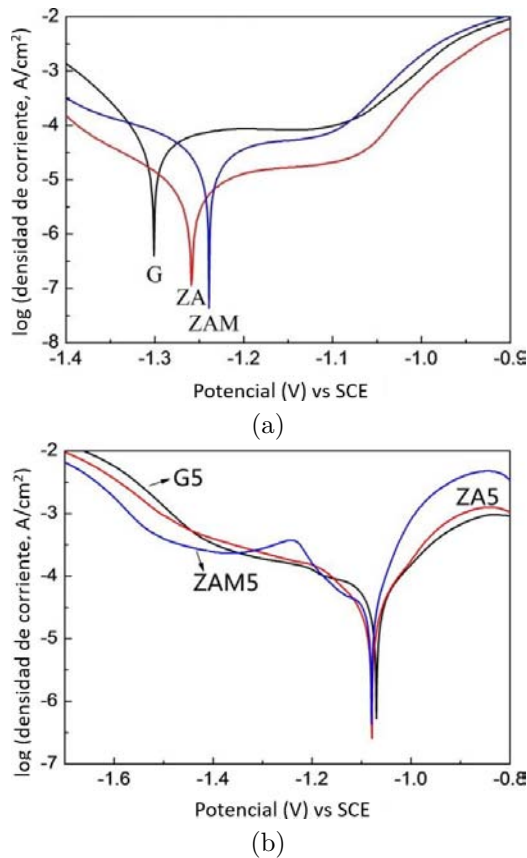


Figura 10. Curvas de polarización potenciodinámica para los recubrimientos de zinc; (a) preparados superficialmente. (b) después de 5 días del ensayo de cámara de niebla salina [10].

Un valor de impedancia más alto normalmente indica una velocidad de corrosión más baja del material. La impedancia del recubrimiento ZAM es más baja que otras en esta etapa, lo que puede deberse a la adición de Mg menos noble, lo cual hará que reaccione primero cuando el recubrimiento ZAM esté en una solución de NaCl, contribuyendo a la alta densidad de corriente de corrosión en la etapa inicial.

La naturaleza protectora del recubrimiento ZAM puede atribuirse a la corrosión inicial de las fases ricas en Mg. Los productos de corrosión de Zn, Al y Mg se aglomeran en el área catódica, que actúan como inhibidores, bloqueando las rutas de corrosión (las microcavidades para la difusión de O_2 y H_2O) a lo largo de los límites de grano de los cristales de Zn, y aumentando la impedancia del recubrimiento, por lo tanto, el proceso de corrosión general del recubrimiento ZAM se retrasa.

Tal como se indicó anteriormente, el comportamiento a la corrosión depende de muchos factores y uno de los más estudiados son los referidos a los parámetros de operación del proceso por inmersión en caliente. Por ejemplo, Elvins *et al.* [14] estudiaron el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura y la resistencia a la corrosión del recubi-

miento Galfan® ($\text{Zn}_{-4,5}\text{Al}$) sobre el acero. Aplicaron tres velocidades de enfriamiento diferentes.

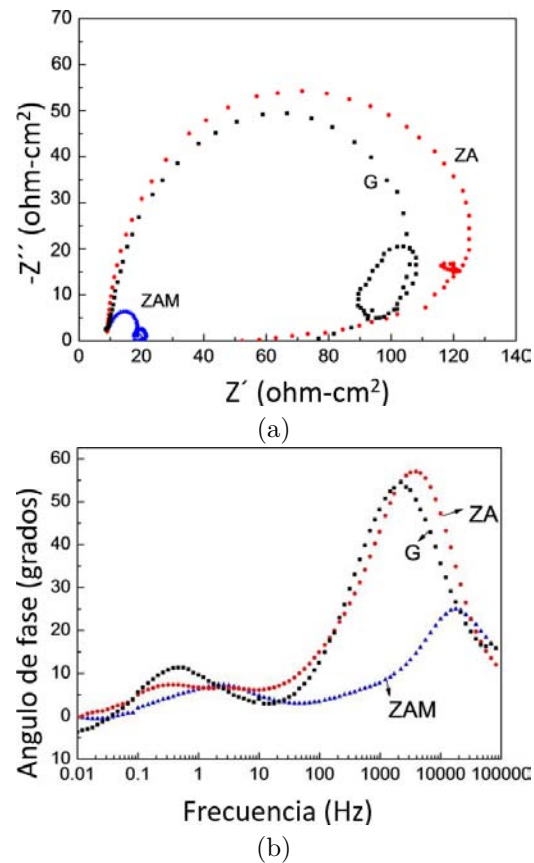


Figura 11. Espectroscopía de impedancia electroquímica de los recubrimientos de zinc. Diagrama de Nyquist (a). Diagrama de Bode (b). [10]

El aumento en la velocidad de enfriamiento no alteró significativamente el volumen de la fracción del zinc primario; sin embargo, el tamaño y el número de las dendritas primarias de zinc fueron alteradas. Las muestras enfriadas rápidamente contenían pequeñas, pero numerosas, dendritas y en las de enfriamiento lento había menos dendritas de mayor tamaño. La cantidad de dendritas de zinc influye en el proceso de corrosión ya que es la fase que se corroe preferentemente, por lo cual resulta en una mayor área anódica y consecuentemente una mayor velocidad de corrosión a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento. En la Figura 12 se observa la corrosión preferencial de las dendritas de zinc respecto al eutéctico.

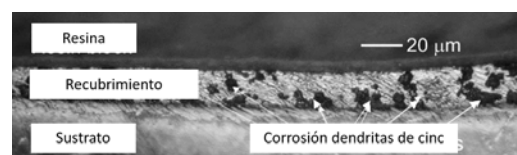


Figura 12. Microestructura del recubrimiento Zn-4,5Al donde se observa el ataque preferencial a las dendritas de zinc. [25]

Otra forma de estudiar mecanismos y entender de una mejor manera el comportamiento a la corrosión de los recubrimientos de zinc es el utilizar técnicas de análisis a los productos de corrosión para proponer mecanismos del proceso, tal como el trabajo realizado por Carbucicchio *et al.* [33], donde estudiaron los productos de corrosión formado en tuberías de acero galvanizado expuesto por dos años a agua caliente, mediante técnicas metalográficas, de difracción de rayos X, así como las técnicas espectroscópicas Mössbauer y Raman. Los resultados obtenidos permitieron establecer que el proceso corrosivo fue causado por un exceso de la temperatura de servicio, ocurriendo una inversión de la polaridad electroquímica entre el zinc y el hierro, creciendo tubérculos de productos de corrosión en las zonas descincificadas de la pared de la tubería hasta perforarse. Los compuestos presentes en los productos de corrosión permitieron sugerir un mecanismo del proceso.

Por otra parte, también es importante mencionar que los procesos corrosivos se ven afectados por algunos esfuerzos mecánicos, o algún elemento específico como el hidrógeno que contribuye a acrecentar el proceso corrosivo, por lo cual también hay investigaciones que evalúan comportamientos sinérgicos de la corrosión con otros tipos de desgaste o esfuerzos mecánicos. En este sentido, Reumont *et al.* [34], presentaron un estudio para investigar el papel de la microestructura en la susceptibilidad a la corrosión asistida por esfuerzos (SCC) en una solución acuosa de cloruro de sodio de un acero galvanizado. Se efectuaron ensayos de deformación en una solución acuosa de NaCl al 3 %. El comportamiento general del acero galvanizado es dúctil. Existe una transición de dúctil a frágil para una velocidad de deformación muy particular en este ambiente. Poca resistencia mecánica del recubrimiento y la reacción de hidrólisis del zinc es necesaria para conducir a la fragilidad, la cual puede estar asociada con un proceso de fragilidad por hidrógeno. La formación de compuestos intermetálicos puede producir un recubrimiento de microestructura resistente al SCC.

Un trabajo similar efectuó Sacco *et al.* [31], donde evaluaron el comportamiento de chapas de acero con recubrimientos de zinc convencional y con Zn-55Al traccionadas uniaxialmente y expuestas a soluciones 0,5 M NaCl; 0,5 M Na₂SO₄; y 0,5 M NaClO₄. Las muestras fueron deformadas hasta alcanzar alargamientos de 1,3; 3,75; 6,25; 7,5 y 12,5 %. Estas y otras muestras sin deformar fueron sometidas a ensayos electroquímicos y medidas de impedancia electroquímica. Los resultados obtenidos permitieron inferir que existen notorias diferencias en la cinética de las reacciones de corrosión que tienen lugar en la superficie de ambos tipos de recubrimiento y que para ambos sistemas acero/recubrimiento metálico dicha cinética es función no solo del grado de deformación aplicado sino también de la composición del medio agresivo considerado.

Rico y Carrasquero [4] efectuaron una revisión donde establecen que la composición química de los baños galvanizados influye fuertemente en las características microestructurales de los recubrimientos y en su comportamiento mecánico. Esta aseveración, junto con los estudios reportados en este trabajo establece que el comportamiento a la corrosión también se ve afectado por la adición de elementos al baño de zinc; además, esto se sustenta en otros trabajos donde se estudiaron los efectos sinérgicos de la corrosión con el comportamiento mecánico [31, 34–38].

Tal como se mencionó anteriormente en la primera sección de este trabajo, otras investigaciones que se destacan con el fin de mejorar las propiedades a la corrosión de los recubrimientos de zinc, es realizar procesos de doble inmersión, que consisten en sumergir el acero consecutivamente, en dos baños líquidos con diferentes composiciones químicas; la primera inmersión se realiza en baño de galvanizado convencional y la segunda en baño de una aleación base zinc con otros elementos, como el aluminio, el magnesio y el silicio. En este sentido, Tanaka *et al.* [12] demostraron que la doble inmersión tiene ventajas tales como la buena adhesión del recubrimiento y la viabilidad de controlar mejor el espesor y la microestructura del recubrimiento, por lo cual también mejora su resistencia a la corrosión. Para establecer la mejora del comportamiento a la corrosión efectuó ensayos estandarizados en laboratorio.

Tachibana y colaboradores [13], también aplicando un proceso de doble inmersión, determinaron que los recubrimientos efectuados por este método presentan un mejor comportamiento a la corrosión que los fabricados por métodos convencionales. Estos resultados se obtuvieron en pruebas realizadas en un medioambiente salino real.

Es importante destacar, que aun cuando se han realizado algunas investigaciones acerca de la aplicación de los procesos de doble inmersión, no hay información certera acerca de los mecanismos que permiten establecer la mejora en la resistencia a la corrosión de estos procesos en comparación con otros métodos convencionales; sin embargo, se estima que la adición a los baños de elementos generalmente más activos que el zinc, tales como el magnesio o el aluminio, permiten la formación de capas pasivas que retardan el proceso corrosivo.

4. Conclusiones

La composición química de los baños galvanizados influye en las características microestructurales de los recubrimientos.

El aumento de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc por inmersión en caliente se orienta a cambiar la composición química de los baños,

con el fin de ampliar la aplicabilidad de estos recubrimientos en ambientes más agresivos como aquellos que contienen cloruros.

La mejora de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de zinc se produce por la adición a los baños de elementos generalmente más activos que el zinc, tales como el magnesio o el aluminio que permiten la formación de capas pasivas que retardan el proceso corrosivo.

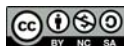
Los estudios de los recubrimientos de Zn-Al-Mg han reportado comportamientos a la corrosión del orden de 10 a 20 veces respecto al recubrimiento de Zn y de 2 a 5 respecto a los de Zn-Al.

Referencias

- [1] J. Cervantes, A. Barba, M. Hernández, J. Salas, J. Espinoza, C. Dénova, G. T.-V. nor, A. Conde, A. Covelo, and R. Valdez, "Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono," *Revista de Metalurgia*, vol. 49, no. 5, pp. 351–359, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1316>
- [2] L. Shiwei, G. Bo, T. Ganfeng, H. Yi, H. Liang, and Y. Shaohua, "Study on the corrosion mechanism of zn-5al-0.5mg-0.08si coating," *Journal of Metallurgy*, vol. 2011, Article ID 917469, pp. 1–6, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2011/917469>
- [3] A. R. Marder, "The metallurgy of zinc-coated steel," *Progress in Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 191–271, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1)
- [4] Y. Rico and E. Carrasquero, "Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: una revisión," *Ingenius*, no. 18, pp. 30–39, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.17163/ings.n18.2017.04>
- [5] American Galvanizers Association, "Hot-dip galvanizing for corrosion protection a specifier's guide," 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/2pGEzeb>
- [6] Y. Rico and J. Hernández, "Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura y comportamiento a la corrosión de recubrimientos Zn-7Al por inmersión en caliente sobre acero," *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 35, pp. 269–275, 12 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2OaV0sy>
- [7] S. D. Cramer and J. Bernard S. Covino, "Corrosion: Fundamentals, testing, and protection," ASM International. The Materials Information Society, Tech. Rep., 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/2pGH6Fd>
- [8] Y. Rico and E. J. Carrasquero, "Microstructural evaluation of double-dip galvanized coatings on carbon steel," *MRS Advances*, vol. 2, no. 62, pp. 3917–3923, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1557/adv.2017.608>
- [9] P. Volovitch, T. N. Vu, C. Allély, A. A. Aal, and K. Ogle, "Understanding corrosion via corrosion product characterization: Ii. role of alloying elements in improving the corrosion resistance of Zn-Al-Mg coatings on steel," *Corrosion Science*, vol. 53, no. 8, pp. 2437–2445, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.03.016>
- [10] C. Yao, S. L. Tay, J. H. Yang, T. Zhu, and W. Gao, "Hot dipped zn-al-mg-cu coating with improved mechanical and anticorrosion properties," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 9, pp. 7083–7096, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/2XChPZq>
- [11] S. Schuerz, M. Fleischanderl, G. H. Luckeneder, K. Preis, T. Haunschmied, G. Mori, and A. C. Kneissl, "Corrosion behaviour of zn-al-mg coated steel sheet in sodium chloride-containing environment," *Corrosion Science*, vol. 51, no. 10, pp. 2355–2363, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.019>
- [12] J. Tanaka, K. Ono, S. Hayashi, K. Ohsasa, and T. Narita, "Effect of mg and si on the microstructure and corrosion behavior of zn-al hot dip coatings on low carbon steel," *ISIJ International*, vol. 42, no. 1, pp. 80–85, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.80>
- [13] K. Tachibana, Y. Morinaga, and M. Mayuzumi, "Hot dip fine zn and zn-al alloy double coating for corrosion resistance at coastal area," *Corrosion Science*, vol. 49, no. 1, pp. 149–157, 2007, progress in Corrosion Research in Commemoration of Centenary of Birth of Professor Go Okamoto. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.015>
- [14] J. Elvins, J. A. Spittle, and D. A. Worsley, "Microstructural changes in zinc aluminium alloy galvanising as a function of processing parameters and their influence on corrosion," *Corrosion Science*, vol. 47, no. 11, pp. 2740–2759, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.011>
- [15] D. Thierry and N. LeBozec, "Corrosion products formed on confined hot-dip galvanized steel in accelerated cyclic corrosion tests," *CORROSION*,

- vol. 65, no. 11, pp. 718–725, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5006/1.3319098>
- [16] M. Dutta, A. K. Halder, and S. B. Singh, “Morphology and properties of hot dip zn-mg and zn-mg-al alloy coatings on steel sheet,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 7, pp. 2578–2584, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.006>
- [17] N. LeBozec, D. Thierry, D. Persson, C. K. Riener, and G. Luckeneder, “Influence of microstructure of zinc-aluminium-magnesium alloy coated steel on the corrosion behavior in outdoor marine atmosphere,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 374, pp. 897–909, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.052>
- [18] P. Volovitch, C. Allely, and K. Ogle, “Understanding corrosion via corrosion product characterization: I. case study of the role of mg alloying in zn-mg coating on steel,” *Corrosion Science*, vol. 51, no. 6, pp. 1251–1262, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.005>
- [19] S. Schürz, G. H. Luckeneder, M. Fleischanderl, P. Mack, H. Gsaller, A. C. Kneissl, and G. Mori, “Chemistry of corrosion products on zn-al-mg alloy coated steel,” *Corrosion Science*, vol. 52, no. 10, pp. 3271–3279, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.044>
- [20] P. Sixtos, J. Cervantes, A. Barba, J. Roviroza, E. Garduño, R. Valdez, M. Trujillo, J. González, J. Salas, and G. Torres, “Evaluación de recubrimientos de aleaciones Zn-Al-Cu obtenidos por inmersión en caliente y por vía termoquímica,” in *XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, del 23 al 25 de septiembre del 2009. Cd. Obregón, Sonora, México*, 2009, pp. 678–682. [Online]. Available: <https://bit.ly/34gcWaQ>
- [21] A. Barba, J. Cervantes, R. González, D. Hernández, V. Hernández, R. Valdez, A. Covelo, and M. Hernández, “Influencia de la adición de pequeñas cantidades de Ni a baños de galvanizado por inmersión en caliente, en las propiedades de aceros al carbono galvanizados,” in *XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM 19 al 21 de septiembre de 2018, Campeche, México*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/37xBQVt>
- [22] C. M. Cotell, J. A. Sprague, and J. F.A. Smidt, *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*, ASM International, Ed., 1994. [Online]. Available: <https://bit.ly/35qcdUQ>
- [23] Y. Li, “Formation of nano-crystalline corrosion products on zn-al alloy coating exposed to seawater,” *Corrosion Science*, vol. 43, no. 9, pp. 1793–1800, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00169-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00169-4)
- [24] M. S. Azevedo, C. Allély, K. Ogle, and P. Volovitch, “Corrosion mechanisms of zn(mg, al) coated steel in accelerated tests and natural exposure: 1. the role of electrolyte composition in the nature of corrosion products and relative corrosion rate,” *Corrosion Science*, vol. 90, pp. 472–481, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.05.014>
- [25] N. C. Hosking, M. A. Ström, P. H. Shipway, and C. D. Rudd, “Corrosion resistance of zinc-magnesium coated steel,” *Corrosion Science*, vol. 49, no. 9, pp. 3669–3695, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.032>
- [26] M. Manna, G. Naidu, N. Rani, and N. Bandyopadhyay, “Characterisation of coating on rebar surface using hot-dip zn and zn-4.9al-0.1 misch metal bath,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, no. 8, pp. 1510–1516, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.07.001>
- [27] A. P. Yadav, H. Katayama, K. Noda, H. Masuda, A. Nishikata, and T. Tsuru, “Effect of al on the galvanic ability of zn-al coating under thin layer of electrolyte,” *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 7, pp. 2411–2422, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.08.050>
- [28] H. C. Shih, J. W. Hsu, C. N. Sun, and S. C. Chung, “The lifetime assessment of hot-dip 5% al-zn coatings in chloride environments,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 150, no. 1, pp. 70–75, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01508-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01508-0)
- [29] O. de Rincón, A. Rincón, M. Sánchez, N. Romero, O. Salas, R. Delgado, B. López, J. Uruchurtu, M. Marroco, and Z. Panosian, “Evaluating Zn, Al and Al-Zn coatings on carbon steel in a special atmosphere,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 3, pp. 1465–1471, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.002>
- [30] S. Flores and K. Paucar, “Evaluación de sistemas de recubrimientos mediante espectroscopía de impedancia electroquímica,” *Jornadas SAM-CONAMET - Simposio Materia 2003*, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/2KIjsPR>
- [31] E. Sacco, J. Culcasi, C. Eisner, and A. D. Darli, “Efecto de la deformación por tracción sobre la orientación cristalográfica del recubrimiento y la resistencia a la corrosión en CNS de chapas de acero con recubrimientos base cinc,” *Revista de Metalurgia*, vol. 38, no. 6,

- pp. 403–409, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2002.v38.i6.425>
- [32] H. Fujisawa, R. Kaneko, and H. Ishikawa, “Hot-Dip Zn-5 % Al alloy-coated Steel Sheets JFE ECOGAL ®,” *JFE Technical Report*, no. 14, pp. 41–45, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/335wY6I>
- [33] M. Carbucicchio, R. Ciprian, F. Ospitali, and G. Palombarini, “Morphology and phase composition of corrosion products formed at the zinc-iron interface of a galvanized steel,” *Corrosion Science*, vol. 50, no. 9, pp. 2605–2613, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.007>
- [34] G. Reumont, J. B. Vogt, A. Iost, and J. Foct, “The effects of an Fe-Zn intermetallic-containing coating on the stress corrosion cracking behavior of a hot-dip galvanized steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 139, no. 2, pp. 265–271, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01017-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01017-9)
- [35] N. Michailidis, F. Stergioudi, G. Maliaris, and A. Tsouknidas, “Influence of galvanization on the corrosion fatigue performance of high-strength steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 259, pp. 456–464, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.049>
- [36] K. A. Yasakau, S. Kallip, A. Lisenkov, M. G. S. Ferreira, and M. L. Zheludkevich, “Initial stages of localized corrosion at cut-edges of adhesively bonded zn and zn-al-mg galvanized steel,” *Electrochimica Acta*, vol. 211, pp. 126–141, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.045>
- [37] E. Carrasquero, Y. Rico, and J. Minchala, “Evaluación de propiedades mecánicas en recubrimientos galvanizados por doble inmersión en caliente sobre acero al carbono,” *INGENIUS*, no. 22, pp. 80–89, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.08>
- [38] K. Zhang, R. Song, and Y. Gao, “Corrosion behavior of hot-dip galvanized advanced high strength steel sheet in a simulated marine atmospheric environment,” *International Journal of Electrochemical Science*, no. 14, pp. 1488–1499, 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.20964/2019.02.13>



NÚMERO DE COEFICIENTES DEL FILTRO DE LAS SUBPORTADORAS EN EL SISTEMA GFDM: EFECTO EN EL DESEMPEÑO

NUMBER OF SUBCARRIER FILTER COEFFICIENTS IN GFDM SYSTEM: EFFECT ON PERFORMANCE

Randy Verdecia Peña^{1,*}, Humberto Millán Vega²

Resumen

El GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) es un esquema de transmisión multiportadora no ortogonal propuesta para la quinta (5G) y futura generación de redes inalámbricas. Por sus atractivas propiedades, está siendo investigada como una forma de onda a ser considerada para los futuros sistemas de redes de comunicaciones. La GFDM es introducida como una generalización del ampliamente utilizado esquema de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y usa un único prefijo cíclico (*Cyclic Prefix, CP*) para un grupo de símbolos. El objetivo principal de este trabajo es presentar cómo impacta la cantidad de coeficientes del filtro de las subportadoras en el desempeño del sistema. Se emplea un método simple para el cálculo de los coeficientes del filtro prototipo. Además, se presenta una estructura para la GFDM aprovechando la estructura de modulación matricial. Se evaluó la tasa de error de bit (*Bit Error Rate, BER*) usando los modelos de receptores presentados en este trabajo. Los resultados muestran que el BER es afectado según la cantidad de coeficientes del filtro prototipo. Basado en los resultados obtenidos, la cantidad de coeficientes tiene relación con el número de intervalos de tiempo del sistema GFDM.

Palabras clave: GFDM, número de coeficientes, filtro prototipo, BER.

Abstract

Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) is a non-orthogonal multicarrier transmission scheme proposed for fifth (5G) and future generation wireless networks. Due to its attractive properties, it has been recently discussed as a candidate waveform for the future wireless communication systems. GFDM is introduced as a generalized form of the widely used Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation scheme and it uses only one cyclic prefix (CP) for a group of symbols. The main focus of this work is to present like impact on the system performance the coefficient quantity of the subcarrier filter. A simple method for the computation of the coefficients of the prototype filter is employed. Besides, it is presented a structure for the GFDM by taking advantage of the arrangement in the modulation matrix. We evaluated the Bit Error Rate (BER) using the receiver models presented in this work. The results showed that the BER is affected according to the coefficients quantity of the prototype filter. Based on the obtained results, the coefficients quantity has a relation with the number of time slots of the GFDM system.

Keywords: GFDM, number of coefficients, prototype filter, BER.

^{1,*}Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones (ETSIT), Universidad Politécnica de Madrid, España. Autor para correspondencia ✉: randy.verdecia@upm.es
<http://orcid.org/0000-0003-4798-2681>

²Departamento de Física (Retirado), Universidad de Granma – Cuba. <http://orcid.org/0000-0001-9421-7494>

Recibido: 25-06-2019, aprobado tras revisión: 25-11-2019

Forma sugerida de citación: Verdecia Peña, R. y Millán Vega, H. (2020). «Número de coeficientes del filtro de las subportadoras en el Sistema GFDM: efecto en el desempeño». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.05>.

1. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas y móviles se han convertido en herramientas esenciales para la vida y la sociedad moderna. Las redes de telecomunicación del futuro necesitan un mayor rendimiento sobre la base de eficiencias espectral y energética muy elevadas, latencia muy pequeña y velocidades de datos muy altas. Para esto se requiere una capa física (PHY) más efectiva [1–3]. La esencia de la capa física de las redes de cuarta generación (4G) es la multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Estos sistemas permiten alcanzar un alto rendimiento de datos. La modulación OFDM es ampliamente utilizada debido a sus características favorables como implementación sencilla basada en la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), y robustez contra canales con desvanecimiento [2,4]. Sin embargo, el escenario de aplicación que se ha previsionalizado para las redes de quinta generación (5G) posee retos donde la modulación OFDM podría tener limitaciones. La baja latencia que se necesita para las comunicaciones vehículo a vehículo y las aplicaciones táctiles de Internet requieren un umbral de datos donde el paquete OFDM con un prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) por símbolo tiene una baja eficiencia espectral [1,4–6].

El requerimiento de OFDM de preservar la ortogonalidad entre subportadoras individuales es esencial para la comunicación máquina a máquina (M2M, *Machine-to-Machine*). Dada la necesidad de bajo consumo de potencia que influye en forma negativa en el proceso de sincronización, este procedimiento no es posible con la modulación OFDM [4,7]. Otra desventaja del sistema OFDM es la alta radiación fuera de banda (OOB, out-of-band) que resulta de la forma rectangular del pulso [8]. Debido a estas deficiencias, OFDM puede satisfacer los requerimientos del 5G de forma limitada.

En los últimos años se han propuesto diferentes formas de onda para superar las limitaciones previamente citadas de OFDM; tal es el caso de FBMC, UPMC y GFDM en las referencias [9–14], en las que se sugieren numerosas formas de onda. En la multiportadora de banco de filtros (FBMC, *Filter Bank Multicarrier*) se da forma a los pulsos de las subportadoras individualmente para reducir las emisiones OOB, causadas por el ancho de banda angosto de las subportadoras, y por la larga longitud de la respuesta al impulso del filtro transmisor. Las aplicaciones que necesitan transmitir un número grande de símbolos sacan provecho de esta modulación. Sin embargo, está claro que este esquema de modulación no es apropiado para escenarios de baja latencia, donde debe alcanzarse alta eficiencia con la transmisión de ráfagas cortas [1,5–7]. En la multiportadora filtrada de manera universal (UPMC, *Universal Filtered Multicarrier*) se filtra un grupo de subporta-

doras para reducir la emisión OOB. La característica principal de esta modulación es que la respuesta al impulso puede ser corta, obteniendo alta eficiencia espectral en transmisiones cortas [1].

La desventaja de UPMC es que no requiere un CP, por lo que es más sensible que CP-OFDM a la desalineación de tiempo corto, y podría no ser apropiado para aplicaciones que necesitan un tiempo largo de sincronización con el fin de ahorrar energía [1,5,6]. En este contexto, la multiplexación por división en frecuencias generalizadas (GFDM, *Generalized Frequency Division Multiplexing*) es una alternativa de esquema multiportadora que está siendo evaluada actualmente como una candidata de capa PHY para la próxima generación de sistemas de comunicaciones móviles. Es interesante notar que la importancia de la GFDM es ser una forma generalizada de la OFDM que preserva la mayoría de sus valiosas propiedades, mientras aborda sus limitaciones. La GFDM puede ofrecer una radiación OOB muy baja. Además, es más eficiente que la OFDM en ancho de banda, ya que utiliza un solo CP para un grupo de símbolos en un bloque, en vez de un CP por símbolo como en el caso de la OFDM [9,15].

La modulación GFDM está concebida para la modulación de bloques independientes, donde cada bloque consiste de un número de subportadoras y símbolos. Los símbolos de datos pertenecientes a las subportadoras son filtros con un prototipo que es desplazado circularmente en los dominios del tiempo y de la frecuencia. El filtrado de las subportadoras resulta en subportadoras no ortogonales, lo que podría producir interferencias entre símbolos (ISI, *Inter Symbol Interference*) y entre portadoras (ICI, *Inter Carrier Interference*). La respuesta impulso del filtro (FIR, *Filter Impulse Response*) puede ser utilizada para filtrar las subportadoras, y esta opción tiene un impacto negativo en el desempeño de la tasa de error binario (BER, *Bit Error Rate*) y en las emisiones OOB, como se muestra en [1]. En este trabajo se presentan curvas de BER para comparar la influencia que tiene la selección del número total de coeficientes del filtro en los sistemas GFDM. Es necesario presentar este aspecto porque el desempeño se degrada cuando el número total de coeficientes no se elige correctamente.

Un símbolo GFDM consiste de una estructura de bloque con MN muestras, donde cada subportadora N transporta M intervalos de tiempo. En un bloque GFDM, la sobrecarga se mantiene pequeña agregando un único CP para un bloque completo que contiene múltiples subportadoras. De este modo, puede utilizarse un período que ayude a mejorar la eficiencia espectral del sistema. Las secciones restantes se organizan de la siguiente manera. El modelo del sistema y las propiedades del transmisor GFDM se presentan en la Sección 2. La Sección 3 presenta diferentes estructuras de receptor. La Sección 4 muestra la expresión del filtro

prototipo que se obtiene de los coeficientes del filtro de subportadora. La Sección 5 analiza el desempeño de la BER en la GFDM, incluyendo las ecuaciones teóricas suponiendo receptores sin impulso (ZF, *Zero-Forcing*), filtro adaptado (MF, *Matched Filter*) y filtro adaptado con cancelación de interferencia paralela (MF-PIC, *Matched Filter-Parallel Interference Cancellation*). Se utilizaron los coeficientes obtenidos en la Sección 4. Finalmente, la Sección 6 presenta algunas conclusiones. El objetivo principal de este trabajo es presentar una estructura para la GFDM aprovechando el arreglo en la matriz de modulación.

Notación: Se utiliza minúscula en negrita para los vectores columna y mayúscula en negrita para las matrices. Todos los vectores están en forma de columna. La transpuesta y la hermítica de vectores y matrices se indican por los superíndices '*T*' y '*H*', respectivamente. Se utiliza \mathbf{W}_{MN} para denotar la matriz transformada discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) de tamaño MN . Asimismo, se supone que \mathbf{W}_{MN} está normalizada, tal que $\mathbf{W}_{MN}\mathbf{W}_{MN}^H = \mathbf{I}_{MN}$, donde \mathbf{I}_{MN} denota la matriz identidad de tamaño MN . Por lo tanto, $\mathbf{W}_{MN}^H = \mathbf{W}_{MN}^{-1}$. Los términos FFT e iFFT se refieren a la implementación rápida de la DFT y la DFT inversa (iDFT), respectivamente.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelo del sistema y propiedades del GFDM

La multiplexación por división en frecuencias generalizadas (GFDM) es un sistema multiportador. El paquete de datos en la GFDM es tal que solo se requiere un CP por bloque de símbolos transmitidos [10]. La Figura 1 presenta la estructura de un paquete de datos GFDM. En el sistema GFDM los símbolos de datos sobre cada subportadora se filtran a través de un filtro pasabanda bien localizado, con la finalidad de limitar la interferencia entre portadoras (ICI) [16]. El paquete de datos del GFDM está organizado en M intervalos de tiempo y M subportadoras.

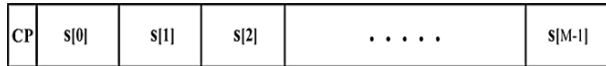


Figura 1. Paquete de datos GFDM.

El sistema OFDM puede producir alta radiación fuera de banda (OOB) y una menor eficiencia en ancho de banda en comparación con GFDM [1, 8] debido al hecho de que el sistema OFDM utiliza un CP por símbolo, como se presenta en la Figura 2

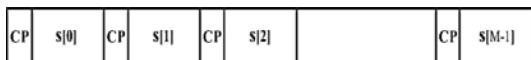


Figura 2. Paquete de datos OFDM.

Considere el diagrama de bloques del transceptor mostrado en la Figura 3. Un mapeador, por ejemplo, QAM [7], mapea los bits codificados a símbolos de una constelación compleja de 2^α valores, donde α es el orden de la modulación. El vector \mathbf{s} denota un bloque de datos que contiene MN símbolos, que puede descomponerse en M intervalos de tiempo y N subportadoras, cada una de acuerdo con $\mathbf{s} = [\mathbf{s}^T[0]\mathbf{s}^T[1], \dots, \mathbf{s}^T[M-1]]^T$ y $\mathbf{s}[m] = [s_0[m]s_1[m], \dots, s_{N-1}[m]]^T, m = 1, 2, \dots, M-1$.

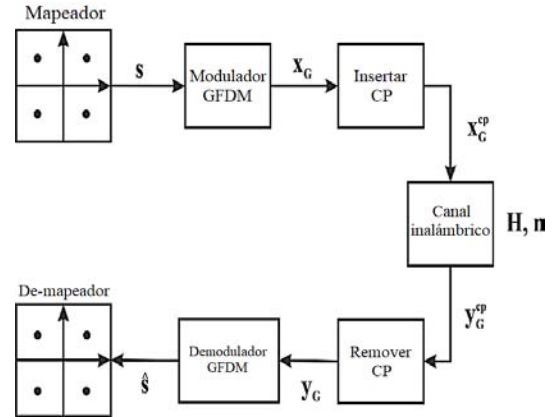


Figura 3. Diagrama de bloques del transceptor para GFDM.

Los símbolos de los datos son tomados de un proceso independiente e idénticamente distribuido (i.i.d.) de media cero y varianza unitaria. La expresión que relaciona los símbolos de los datos de entrada $\mathbf{s}[m]$ y la salida $\mathbf{x}[m]$ del transmisor GFDM, puede expresarse como [16].

$$\mathbf{x}[m] = \mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{C}_f \mathbf{s}_{ex}[m], \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (1)$$

donde \mathbf{W}_{MN}^{-1} es la matriz iDFT de tamaño $(MN \times MN)$, \mathbf{C}_f es una matriz circular de tamaño $(MN \times MN)$, con la primera columna constituida por el vector $\mathbf{c} = [c_0 c_1 \dots c_{F-1} 0 \dots 0 c_{F-1} \dots c_1]^T$. Los coeficientes c_f son los componentes del espectro discreto del pulso que establece el formato, con $f \in (0, 1, \dots, F-1)$ y $(1 \leq F \leq \frac{MN}{2})$ [17, 18]. En este trabajo se mostrará que la cantidad de coeficientes influye en el desempeño del sistema GFDM; $\mathbf{s}_{ex}[m]$ es el vector expandido $\mathbf{s}[m]$ de símbolos de datos que puede ser organizado como $\mathbf{s}_{ex}[m] = [s_0[m] \mathbf{z}_{M-1}^T s_1[m] \mathbf{z}_{M-1}^T s_2[m] \mathbf{z}_{M-1}^T \dots \mathbf{z}_{M-1}^T s_{N-1}[m]]^T$, donde \mathbf{z}_{M-1} representa un vector columna de tamaño $(M-1 \times 1)$ [17, 18].

La expresión (1) se implementa en dos pasos. Primero se ejecuta la convolución circular de \mathbf{c} y $\mathbf{s}_{ex}[m]$ para obtener $\mathbf{C}_f \mathbf{s}_{ex}[m]$. Posteriormente se aplica una iFFT de tamaño $(MN \times MN)$ al resultado del primer paso, para obtener el vector $\mathbf{x}[m]$ de tamaño $(MN \times 1)$.

Es útil comentar que la complejidad computacional representada por (1) está determinada de manera dominante por una iFFT de dimensión $(MN \times MN)$. El resultado $\mathbf{C}_f \mathbf{s}_{ex}[m]$ puede calcularse como:

$$\mathbf{C}_f \mathbf{s}_{ex}[m] = \mathbf{W}_{MN} [(\mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{c}) \odot (\mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{s}_{ex}[m])], \quad (2)$$

donde \odot es un operador que denota multiplicación punto a punto, y la convolución circular de los vectores \mathbf{c} y $\mathbf{s}_{ex}[m]$ se realiza a través de la multiplicación punto a punto de sus respectivas iDFT y posteriormente se aplica una DFT al resultado. Si se consideran las expresiones (1) y (2) el vector $\mathbf{x}[m]$ se reduce a:

$$\mathbf{x}[m] = \mathbf{k} \odot (\mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{s}_{ex}[m]) \quad (3)$$

donde $\mathbf{k} = \mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{c}$ es el vector de los coeficientes del filtro prototipo que influye en el desempeño del GFDM. La complejidad computacional de (3) puede reducirse significativamente tomando en consideración que el vector $\mathbf{s}_{ex}[m]$ es la versión expandida del vector $\mathbf{s}[m]$ de símbolos. Sin embargo, el producto $\mathbf{W}_{MN}^{-1} \mathbf{s}_{ex}[m]$ puede obtenerse a través de M repeticiones de $\mathbf{W}_N^{-1} \mathbf{s}[m]$ en una columna. Entonces la complejidad computacional en (3) puede calcularse a través de una iFFT de dimensión $(N \times N)$.

Los símbolos de datos \mathbf{s} del paquete GFDM a ser transmitido, que se muestra en la Figura 2, pueden obtenerse mediante la superposición de los M vectores $\mathbf{x}[m]$. Esta operación puede describirse matemáticamente como:

$$\mathbf{x}_G = \sum_m^{M-1} \text{circshift}(\mathbf{x}[m], mN) \quad (4)$$

donde $\text{circshift}(\cdot)$ significa desplazamiento circular descendente. El paquete a ser transmitido se completa agregando las CP muestras para obtener el vector \mathbf{x}_G^{cp} . Un modelo interesante de un sistema GFDM es un modelo matricial con el objetivo de tener similitud con el sistema OFDM. El modelo presentado en [17–22] y el vector \mathbf{x}_G puede ser expresado en forma matricial como:

$$\mathbf{x}_G = \mathbf{A} \mathbf{s} \quad (5)$$

donde \mathbf{s} es el vector columna que contiene todos los símbolos de datos del paquete GFDM de M intervalos de tiempo y N subportadoras, como se ilustra en la Figura 2. \mathbf{A} es la matriz del sistema GFDM que está compuesta por los coeficientes c_f del filtro prototipo que afectan el desempeño del sistema. Los coeficientes c_f serán calculados en otra sección.

2.2. Implementación del receptor

El vector \mathbf{x}_G es la salida del modulador GFDM (ver Figura 3), y \mathbf{x}_G contiene las muestras transmitidas

que corresponden al bloque de datos \mathbf{s} del GFDM de tamaño $(MN \times 1)$. Finalmente, se agregó en el lado del transmisor un prefijo cíclico de L_{CP} muestras para producir \mathbf{x}_G^{cp} . Posteriormente la señal es afectada por ruido blanco gaussiano aditivo (AGWN, *Additive Gaussian White Noise*), $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{MN})$, donde σ_n^2 es la varianza del ruido. La señal del receptor luego de remover CP muestras puede expresarse como:

$$\mathbf{y}_G = \mathbf{H} \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (6)$$

donde \mathbf{H} representa la matriz circular del canal de tamaño $(MN \times MN)$. La primera columna está determinada por el vector $\mathbf{h}_{ch} = [h_0 h_1 h_2 \dots h_{ch-1}]^T$ que corresponde a la respuesta al impulso del filtro pasabajo discreto de tamaño ch (completado con ceros) equivalente al canal. La matriz circular \mathbf{H} puede expresarse como:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & h_0 & \ddots & 0 \\ h_{ch-1} & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & h_{ch-1} & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir de la matriz representada por la ecuación (7), pueden utilizarse dos tipos de receptores GFDM estándar, es decir, Sin Impulso (ZF) y Filtro Adaptado (*Matched Filter*, MF) [4], [22, 23]. Se ha definido la matriz \mathbf{B} como el producto de \mathbf{H} y \mathbf{A} . Entonces, la ecuación (6) puede reescribirse como:

$$\mathbf{y}_G = \mathbf{B} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (8)$$

El esquema de ecualización utilizado en este trabajo se presenta en la Figura 4. En el diagrama de bloques, $Q(\cdot)$ es una función que relaciona cada componente del vector de la señal transmitida con el símbolo más cercano a la constelación de la señal de la modulación utilizada y $D(\cdot)$ determina la distancia mínima de acuerdo a la métrica utilizada en el detector PIC. El interruptor en la figura define el receptor empleado en cada estado para obtener el estimado final. Aquí ZF y MF son detectores lineales y PIC es el detector de Cancelación de Interferencia Paralela (*Parallel Interference Cancellation*). Por lo tanto, el PIC se utiliza como una primera estimación de la señal de salida del bloque MF.

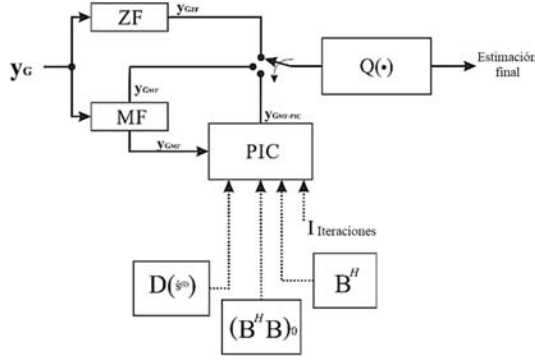


Figura 4. Diagrama de bloques del receptor para el GFDM.

El receptor ZF se caracteriza por la matriz \mathbf{B}_{ZF} , que representa la inversa de la matriz \mathbf{B} . Después de obtener la ecualización ZF, la demodulación lineal de la señal recibida puede expresarse como:

$$\mathbf{y}_{G_{ZF}} = \mathbf{B}_{ZF}(\mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{n}) = \mathbf{s} + \mathbf{n}_{ZF} \quad (9)$$

donde $\mathbf{n}_{ZF} = \mathbf{B}_{ZF}\mathbf{n}$ es el ruido después de la ecualización ZF que afecta la señal recibida de tamaño $(MN \times 1)$.

El segundo tipo de receptor, el MF, es descrito por la matriz $\mathbf{B}_{MF} = \mathbf{B}^H$. Cuando se aplica al vector recibido en (8), la señal recibida puede expresarse como:

$$\mathbf{y}_{G_{MF}} = \mathbf{B}_{MF}(\mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{n}) = \mathbf{B}_{MF}\mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{n}_{MF} \quad (10)$$

donde $\mathbf{n}_{MF} = \mathbf{B}_{MF}\mathbf{n}$ es el ruido después de la ecualización MF de tamaño $(MN \times 1)$.

La implementación del detector PIC presenta la menor complejidad computacional, en comparación con otros detectores de cancelación como SIC [17–20]. La primera estimación de los símbolos de datos al detector PIC se obtiene como la señal de salida del detector MF. Este receptor puede implementarse por las ecuaciones:

$$\hat{\mathbf{s}}^{(j)} = Q(\mathbf{r}^{(j-1)}), j = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

$$\mathbf{r}^{(j-1)} = \mathbf{B}^H \mathbf{y}_G - (\mathbf{B}^H \mathbf{B})_z \hat{\mathbf{s}}^{(j-1)}, j = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

donde $(\mathbf{B}^H \mathbf{B})_z$ corresponde a la matriz $\mathbf{B}^H \mathbf{B}$ con ceros en la diagonal principal.

Las estimaciones de símbolos utilizando las ecuaciones (11) y (12) son generadas secuencialmente hasta un número máximo de J iteraciones. En el presente trabajo se consideró que el proceso puede ser interrumpido después de la j-ésima iteración ($1 \leq j \leq J$) dependiendo de la calidad de los estimados generados. La métrica de Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*) empleada aquí corresponde a la métrica de Mínima Distancia (MD). Puede calcularse como:

$$MD(\hat{\mathbf{s}}^{(j)}) = \|\mathbf{y}_G - \mathbf{B}\hat{\mathbf{s}}^{(j)}\|^2 \quad (13)$$

Si se detecta una reducción en la calidad de un estimado dado, esto es, $MD(\hat{\mathbf{s}}^{(j)}) \geq MD(\hat{\mathbf{s}}^{(j-1)})$, el estimado $MD(\hat{\mathbf{s}}^{(j-1)})$ es adoptado como el final.

2.3. Cálculo de los Coeficientes de los Filtros de las Subportadoras

El filtrado de las subportadoras en el bloque modulador GFDM que se presenta en la Figura 3 es esencial para el desempeño del sistema. En esta sección se presenta cómo determinar sus coeficientes. El filtro prototipo que se presenta en [16, 24–26], corresponde a una clase de filtros pasa-bajo reales cuya respuesta al impulso puede expresarse como:

$$f_p[n] = \begin{cases} c_0 + 2 \sum_{l=1}^{F-1} c_l \cos\left(\frac{2\pi ln}{P}\right), & 0 \leq n \leq P \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

donde $P = FK$, y c_l ($0 \leq l < F$) son coeficientes reales, el factor F de solapamiento es un entero positivo y K es el número de canales en el sistema TMUX.

De acuerdo a Mirabbasi y Martin [25], los coeficientes c_l ($0 \leq l < F$), deben satisfacer las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} c_0 = 1 \\ c_l^2 + c_{F-l}^2 = 1, & l = 1, 2, \dots, F/2 \end{cases} \quad (15)$$

Si los coeficientes c_l son seleccionados tal que (15) se satisfaga, entonces la frecuencia de -3 dB del filtro prototipo sería aproximadamente $\frac{\pi}{P}$, cuando F es par. La mínima atenuación en la banda rechazada (MSA, *Minimum Stopband Attenuation*) y la tasa aproximada de decaimiento (ARF, *Approximate Rate of Fall-Off*) de los lóbulos laterales dependen del factor F de solapamiento y son independientes del orden del filtro [25].

Se requiere determinar los coeficientes c_l de F resolviendo un sistema. En [24] se obtuvo la ecuación auxiliar:

$$c_0 + 2 \sum_{l=1}^{F-1} c_l = 0 \quad (16)$$

Si se satisface la ecuación (16), entonces los lóbulos laterales de la transformada discreta de Fourier en la ecuación (14) tienen la tasa aproximada de decaimiento (*fall-off rate*) de $|\omega|^{-3}$, con ω definiendo las frecuencias uniformemente espaciadas alrededor del círculo unitario. Esto puede escribirse como:

$$\omega_l = \frac{2\pi l}{P} \quad (l \text{ is an integer number}) \quad (17)$$

Mediante las ecuaciones (15) y (16) es posible construir un sistema de ecuaciones con el mismo número de incógnitas. Además, la ecuación (18) puede utilizarse

para construir las ecuaciones restantes necesarias para tener un sistema de F ecuaciones.

$$\sum_{l=1}^{F-1} l^q c_l = 0, \quad q \geq 2 \quad (18)$$

Con las ecuaciones previas es posible obtener los valores de los coeficientes del filtro prototipo para $F = 2$, $F = 3$ y $F = 15$. Éstos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes del Filtro prototipo F

Coeficientes	$F = 2$	$F = 3$	$F = 15$
c_0	1	1	1
c_1	-0,7071	-0,9114	-0,9999
c_2		0,4114	0,9992
c_3			-0,988
c_4			0,9435
c_5			-0,8797
c_6			0,8328
c_7			-0,7628
c_8			0,6466
c_9			-0,5536
c_{10}			0,4755
c_{11}			-0,3313
c_{12}			0,1543
c_{13}			-0,0412
c_{14}			0,0048

3. Resultados y Discusión

Esta sección presenta los resultados de las simulaciones junto con las expresiones teóricas obtenidas. Con el fin de estudiar el efecto en la BER del número de coeficientes del filtro de las subportadoras en el sistema GFDM, se ha considerado en caso de los receptores ZF, MF y MF-PIC.

3.1. Análisis de la Tasa de Error Binario (BER)

En esta subsección se analiza el desempeño del sistema GFDM en términos de la BER vs. E_b/N_0 , suponiendo que se utilizan ZF, MF y MF-PIC. El ZF es capaz de remover la generación propia de interferencia, al costo de introducir un aumento del ruido [1]. El receptor MF-PIC fue el más flexible y adaptable a diferentes configuraciones del paquete de datos GFDM [17,18], como se describe en la Figura 1. La Tabla 2 presenta los parámetros del sistema utilizados en la simulación, mientras que la Tabla 3 muestra la respuesta impulso del canal que fue utilizada en la evaluación del desempeño de la BER. La respuesta impulso del canal con múltiples trayectorias (*multipath*) se normaliza para tener energía unitaria, y la longitud de la banda de guarda CP es $G = ch$.

Tabla 2. Parámetros del Sistema

Parámetros	GFDM (I)	GFDM (II)
Canal de Modulación (ch)	4-QAM 6	4-QAM 8
Intervalos de tiempo \times Subportadora ($M \times N$)	4×64	16×32
Cantidad de símbolos transmitidos	$76,8 \times 10^6$	$153,6 \times 10^6$
Número de coeficientes del filtro (F)	2,3,15	-,15

Tabla 3. Modelo del Canal

Canal	Respuesta impulso discreta (I)	Respuesta impulso discreta (II)
Canal con Multipath	0,7774	0,6961
	0,4905	0,501
	0,3095	0,3605
	0,1953	0,2595
	0,1232	0,1867
	0,0777	0,1343
	-	0,097
	-	0,0696

La Figura 5 compara el desempeño de la BER del ZF clásico en el sistema GFDM con diferentes números de coeficientes del filtro de las subportadoras, considerando los parámetros del sistema de la Tabla 2 y el canal con multipath de la Tabla 3. Los resultados presentados en la Figura 5 sugieren que el sistema GFDM logró el mejor desempeño cuando $F = 3$. En este caso la BER estuvo en el orden de 2×10^{-2} cuando se compara con los resultados presentados para $F = 2$, mientras que $F = 15$ tuvo más de 3 dB de ventaja.

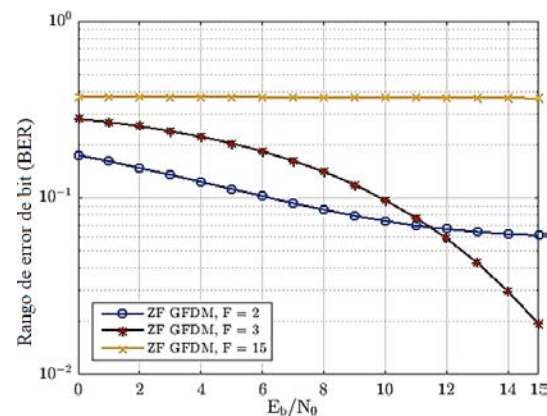


Figura 5. Resultados de la simulación de la BER para el receptor ZF en GFDM (I), canal I.

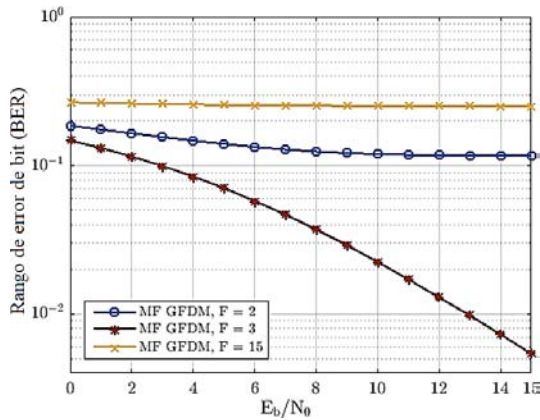


Figura 6. Resultados de la simulación de la BER para el receptor MF en GFDM (I), canal I.

Las Figuras 6 y 7 ilustran el desempeño de la BER para los receptores MF y MF-PIC, respectivamente, considerando los tres casos de F . Las figuras muestran que el desempeño del sistema GFDM depende fuertemente del número de coeficientes del filtro prototipo de las subportadoras. El caso $F = M - 1$ representó la mejor opción de número de coeficientes del filtro en el sistema GFDM. Aquí M representa los intervalos de tiempo del sistema, como se muestra en la Figura 2.

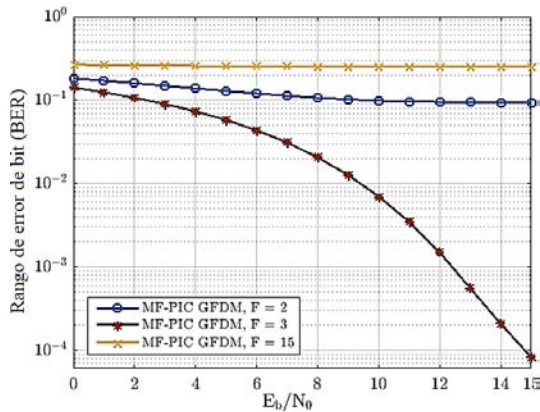


Figura 7. Resultados de la simulación de la BER para el receptor MF-PIC en GFDM (I), canal I.

Los resultados mostrados en la Figura 8 sugieren que utilizando $F = 3$ para los diferentes receptores, el detector MF-PIC tuvo el mejor desempeño del sistema GFDM. Se encontró que el receptor MF es 4 dB más eficiente que el ZF, con menor complejidad computacional. El MF-PIC es más complejo que ZF y MF debido al número de iteraciones [18]. Además, en la Figura 8 se presentan (como una comparación) dos curvas de desempeño, una 4-QAM teórica y otra ZF CP-OFDM con 64 FFT. Se encontró que el desempeño de la BER del esquema MF-PIC es aproximadamente igual al del ZF CP-OFDM FFT 64, con una diferencia de 0,5 dB a favor del sistema CP-OFDM. La causa de esta pequeña diferencia es que el sistema GFDM es

afectado por la matriz de transmisión, que depende del número de coeficientes. Sin embargo, ambos sistemas tienen la misma complejidad computacional en la generación de la señal ya que necesitan FFT 64, pero el GFDM es más eficiente que OFDM en términos de espectro porque sólo necesita un CP para transmitir un paquete de datos de 256 símbolos. Por otra parte, la gran diferencia en el desempeño de la BER del 4-QAM es producida porque se considera como un sistema con AWGN.

En las simulaciones ambos sistemas tienen la misma complejidad computacional en la generación de la señal ya que ambos necesitan FFT 64, pero el GFDM es más eficiente que OFDM en términos del espectro porque sólo necesita un CP para transmitir un paquete de datos de 256 símbolos.

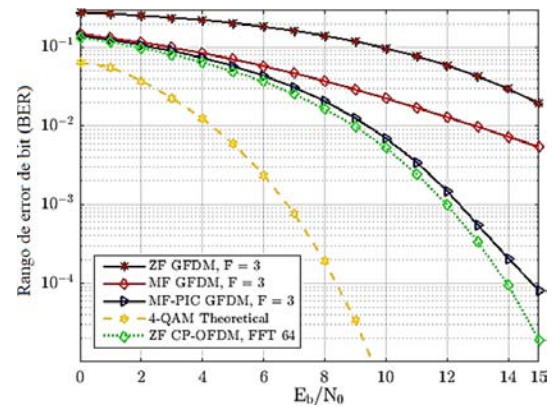


Figura 8. Comparación de los resultados de las simulaciones para los receptores ZF, MF y MF-PIC en GFDM (I) con $F = 3$, 4-QAM teórico y ZF CP-OFDM FFT 64, canal I.

La Figura 9 presenta otras simulaciones considerando que el sistema GFDM tiene matrices de dimensión (512×512) y las propiedades descritas en la Tabla 2 para GFDM (II). Las respuestas impulso del canal tienen 8 tomas como se muestra en la Tabla 3. La Figura 9 muestra que el desempeño del esquema detector MF-PIC es aproximadamente el mismo que con ZF CP-OFDM FFT 32, con una diferencia en el desempeño de 0,5 dB a favor del sistema CP-OFDM. Aquí es posible verificar nuevamente que existe una relación intrínseca con el total de coeficientes del filtro de la subportadora, porque el mejor desempeño que puede alcanzar el sistema GFDM es igual al del sistema OFDM. La degradación del desempeño en la Figura 9 en comparación con la Figura 8 está dada por el efecto del canal por el incremento en el número de tomas.

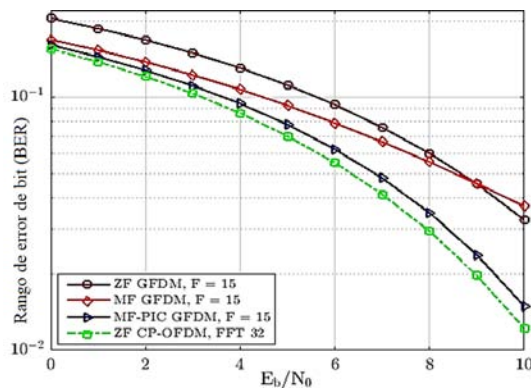


Figura 9. Comparación de los resultados de las simulaciones para los receptores ZF, MF y MF-PIC en GFD (II) con $F = 15$ y ZF CP-OFDM FFT 32, canal II.

4. Conclusiones

Los escenarios de implementación esperados para las redes inalámbricas 5G plantean retos, ya que las tecnologías disponibles de capa física exhiben un desempeño limitado debido a sus deficiencias. El sistema GFD parece un candidato útil por su rendimiento con el sistema OFDM. La propiedad clave del sistema GFD es su flexibilidad, tal que diferentes aplicaciones pueden tener una solución simple. De esta manera, es importante garantizar la coexistencia con otras tecnologías, como la 4G actual.

Se produjeron esquemas de modulación y demodulación para el sistema GFD. Los esquemas presentados tienen una estructura matricial que reduce la complejidad computacional, sin incurrir en ninguna penalización por deterioro del desempeño. Utilizando la estructura matricial del transmisor y del receptor de los sistemas GFD, se analizó y comparó el desempeño en la BER para los diferentes coeficientes calculados. Se mostró que el desempeño de la BER en el sistema GFD depende del número de coeficientes del filtro y del filtro prototipo. En el sistema GFD, el incremento del número total de coeficientes del filtro no mejora el desempeño. El total de coeficientes depende del número de subportadoras, porque podría filtrar símbolos de otros paquetes y generar interferencia. El desempeño del sistema está condicionado por el número preciso de coeficientes.

Referencias

[1] N. Michailow, M. Matthé, I. S. Gaspar, A. N. Caldeilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, Sep. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2345566>

[2] E. Öztürk, E. Basar, and H. A. Çirpan, "Generalized frequency division multiplexing with flexible index modulation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 24 727–24 746, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2768401>

[3] G. Wunder, P. Jung, M. Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Y. Chen, S. T. Brink, I. Gaspar, N. Michailow, A. Festag, L. Mendes, N. Cassiau, D. Ktenas, M. Dryjanski, S. Pietrzyk, B. Eged, P. Vago, and F. Wiedmann, "5gnow: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 97–105, February 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736749>

[4] L. Sendrei and S. Marchevský, "On the performance of gfdm systems undergoing nonlinear amplification," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 15, no. 1, pp. 9–14, 2015. [Online]. Available: <http://doi.org/10.15546/aei-2015-0002>

[5] S. K. Bandari, V. M. Vakamulla, and A. Drosopoulos, "Gfdm/oqam performance analysis under nakagami fading channels," *Physical Communication*, vol. 26, pp. 162–169, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2017.12.008>

[6] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5g – ofdm vs. fbmc vs. ufmc," in *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, May 2014, pp. 457–460. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2014.6877912>

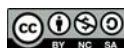
[7] A. N. Ibrahim and M. F. L. Abdullah, "The potential of fbmc over ofdm for the future 5g mobile communication technology," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1883, no. 1, p. 020001, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5002019>

[8] E. Öztürk, E. Basar, and H. A. Çirpan, "Spatial modulation gfdm: A low complexity mimo-gfdm system for 5g wireless networks," in *2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2016, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2016.7901544>

[9] A. Farhang, N. Marchetti, and L. E. Doyle, "Low-complexity modem design for gfdm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 6, pp. 1507–1518, March 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2502546>

[10] A. M. Tonello and M. Girotto, "Cyclic block fnt modulation for broadband power line communications," in *2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, March

- 2013, pp. 247–251. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2013.6525858>
- [11] G. Fettweis, M. Krondorf, and S. Bit-tner, “Gfdm - generalized frequency division multiplexing,” in *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, April 2009, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/VETECS.2009.5073571>
- [12] H. Lin and P. Siohan, “An advanced multi-carrier modulation for future radio systems,” in *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2014, pp. 8097–8101. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2014.6855178>
- [13] M. Renfors, J. Yli-Kaakinen, and F. J. Harris, “Analysis and design of efficient and flexible fast-convolution based multirate filter banks,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 15, pp. 3768–3783, Aug 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2330331>
- [14] A. Farhang, N. Marchetti, L. E. Doyle, and B. Farhang-Boroujeny, “Filter bank multicarrier for massive mimo,” in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Sep. 2014, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6965986>
- [15] R. Datta and G. Fettweis, “Improved aclr by cancellation carrier insertion in gfdm based cognitive radios,” in *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2014, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2014.7022943>
- [16] B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, “Derivation of gfdm based on ofdm principles,” in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2015, pp. 2680–2685. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7248730>
- [17] R. Verdecia Peña, R. Pereira David, and R. Sampaio-Neto, “Detecção de sinais e estimação de canal em sistemas gfdm,” in *XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinal SBrT2019, At: Petrópolis, RJ*, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/34VPa17>
- [18] R. Verdecia Peña, “Análise espectral, detecção de sinais e estimação de canal em sistemas GFDM,” Master’s thesis, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/34LM96N>
- [19] J. P. Mayoral Arteaga, “Detecção de sinais em sistemas com transmissão gfdm,” Master’s thesis, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2DEbbc2>
- [20] J. P. Mayoral Arteaga, R. Pereira David, and R. Sampaio Neto, “Simultaneous detection and parallel interference cancellation in GFDM for 5G,” in *XXXV Simposio brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais - SBRT2017, 3-6 de setembro de 2017, São Pedro, SP*, 2017, pp. 220–224. [Online]. Available: <https://bit.ly/387wqRF>
- [21] R. Verdecia Peña, “Análisis del desempeño de los esquemas de modulación BPSK y QPSK para diferentes condiciones de canales en sistema GFDM,” *MASKAY*, vol. 8, no. 1, pp. 7–112, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.24133/maskay.v8i1.506>
- [22] —, “Desempeño de los métodos de detección de señales con modulación QPSK en sistema GFDM para 5G,” *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 12, pp. 104–120, 09 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/33GWbo9>
- [23] N. Michailow, R. Datta, S. Krone, M. Lentmaier, and G. Fettweis, “Generalized frequency division multiplexing: A flexible multi-carrier modulation scheme for 5th generation cellular networks,” 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/2rQep9B>
- [24] N. Michailow, S. Krone, M. Lentmaier, and G. Fettweis, “Bit error rate performance of generalized frequency division multiplexing,” in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sep. 2012, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.6399305>
- [25] S. Mirabbasi and K. Martin, “Overlapped complex-modulated transmultiplexer filters with simplified design and superior stopbands,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 50, no. 8, pp. 456–469, Aug 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2003.813592>
- [26] K. W. Martin, “Small side-lobe filter design for multitone data-communication applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 45, no. 8, pp. 1155–1161, Aug 1998.



FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE ALTO RENDIMIENTO MEDIOAMBIENTAL CON RESINA EPOXI DE ORIGEN RENOVABLE Y NÚCLEOS LIGEROS PERMEABLES PARA INFUSIÓN ASISTIDA POR VACÍO

MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH ENVIRONMENTAL EFFICIENCY USING EPOXY RESIN OF RENEWABLE ORIGIN AND PERMEABLE LIGHT CORES FOR VACUUM-ASSISTED INFUSION MOLDING

Diego Lascano^{1,2}, Jorge Valcárcel¹, Rafael Balart¹, Luís Quiles-Carrillo¹,
 Teodomiro Boronat¹

Resumen

Este trabajo se centra en la fabricación y caracterización de nuevos materiales tipo sándwich híbridos de bajo peso, con diferentes configuraciones de apilamiento de refuerzo de basalto y lino tratadas previamente con silanos. Para aligerar el peso y facilitar la fabricación, se empleó un núcleo de poliéster no tejido que, además de aligerar el peso del compuesto también actuó como medio de difusión de la resina. Se empleó una resina epoxi de origen parcialmente renovable con un diluyente reactivo derivado de aceites vegetales epoxidados que contribuye a un 31 % de origen renovable. Los compuestos híbridos se fabricaron mediante moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM), donde el núcleo se utilizó como medio de infusión de la resina. Las propiedades mecánicas se evaluaron en condiciones de impacto y de flexión.

Abstract

This work focuses on the manufacturing and characterization of novel and lightweight hybrid sandwich-type structures, using different stacking sequences of flax and basalt fabrics as reinforcement fibers, both of them previously silanized. To reduce the overall weight and facilitate the manufacturing process, a polyester non-woven core, was used which, besides reducing the weight of the composite it also acts as a media to spread the resin. These composites were manufactured with a partially bio-based epoxy resin with a reactive diluent derived from epoxidized vegetable oils that contributes to a 31 % of biobased content. The hybrid composites were obtained by vacuum-assisted resin infusion moulding (VARIM), where the core was used as a media to spread the resin. The mechanical properties were evaluated in flexural and impact conditions.

^{1,*}Instituto Tecnológico de Materiales (ITM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España. Autor para correspondencia ✉: dielas@epsa.upv.es <http://orcid.org/0000-0002-0996-1946>
<https://orcid.org/0000-0001-9053-4425>, <http://orcid.org/0000-0001-5670-7126>
<http://orcid.org/0000-0001-8037-2215>, <http://orcid.org/0000-0002-2144-2874>

²Escuela Politécnica Nacional, 17-01-2759, Quito, Ecuador

Recibido: 07-11-2019, aprobado tras revisión: 09-12-2019

Forma sugerida de citación: Lascano, D.; Valcárcel, J.; Balart, R.; Quiles-Carrillo, L. y Boronat, T. (2020). «Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 62-73. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.06>.

La interacción en la intercara fibra-matriz se evaluó por medio de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). Los datos revelaron que el tratamiento de silanos funciona mejor en las fibras de basalto que en las fibras de lino, resultando en propiedades a flexión superiores en las estructuras donde estas fibras están presentes. Cabe mencionar que la distribución de apilamiento influye directamente en las propiedades a flexión, pero no afecta en la absorción de energía en condiciones de impacto.

Palabras clave: materiales compuestos híbridos, núcleo no tejidos, agentes de acoplamiento de silano, VARIM, fibras de basalto, fibras de lino.

The interactions in the fiber-matrix interface were studied through field emission scanning electron microscopy (FESEM). The obtained data revealed that the silane (coupling agent) treatment works better on basalt fibers than on flax fibers, resulting in superior flexural properties on structures where these fibers are present. It is noteworthy to mention that the stacking sequence of plies directly influences the flexural properties, but it does not significantly affect the energy absorbed when these composites work on impact conditions.

Keywords: Hybrid composite materials; non-woven cores; silane coupling agents; VARIM process, basalt fibers; flax fibers.

1. Introducción

El uso de materiales poliméricos compuestos se ha incrementado considerablemente en nuestras vidas, no solo en aplicaciones técnicas, sino también en aplicaciones diarias. Esto se debe a su capacidad de adaptarse a las propiedades deseadas [1]. Las matrices termoestables tales como resinas de poliéster no saturadas (UP, unsaturated polyester), epoxi (EP, epoxy), fenólicas (PF, phenolics) [2–4], entre otras, y las fibras de refuerzo tales como carbón (CF, carbon fibers), aramida (AF, aramid fibers) y vidrio (GF, glass fibers) son las más utilizadas debido a las altas propiedades mecánicas que pueden proporcionar conjuntamente con pesos muy bajos, que las hacen adecuadas para aplicaciones automotrices, deportivas, balísticas y de construcción civil, entre otras [5–9]. No obstante, las fibras convencionales de alto desempeño presentan algunas desventajas. Entre otras, un inconveniente crítico de estas fibras está relacionado a los costos y condiciones de producción como, por ejemplo, que las CF requieren temperaturas extremadamente altas para obtener fibras altamente purificadas. Por otra parte, estas fibras de refuerzo convencionales tienen un impacto ambiental importante, relacionado a las etapas de producción y la problemática luego de su vida útil; esto significa que su producción en masa es prácticamente inviable [10, 11].

Las matrices basadas en resinas epoxi son las más utilizadas, debido a las excelentes propiedades mecánicas, térmicas y de recubrimiento que proporcionan a materiales compuestos. En general, esto se logra por los grupos funcionales que se encuentran en su estructura, concretamente anillos epoxi/oxirano que pueden polimerizarse para formar estructuras de red 3D. La mayoría de las resinas epoxi actualmente disponibles están basadas en éter de diglicidil de bisfenol A (DGEBA, diglycidyl ether of bisphenol A), que proviene de la reacción del epiclorohidrin y el bisfenol A (BPA, bisphenol A) [12]. Estos componentes son materiales derivados del petróleo y, como las fibras sintéticas, tienen un impacto considerable en el aumento de la huella de carbono.

Con el fin de desarrollar materiales compuestos con impacto ambiental bajo o restringido, se han llevado a cabo estudios de investigación con ambos componentes, es decir, las matrices termoestables y las fibras de refuerzo [13]. Los epoxi tradicionales son bioderivados, como se mencionó anteriormente, pero en décadas recientes se han fabricado industrialmente nuevos epoxi a partir de recursos renovables, contribuyendo así a disminuir la huella de carbono global.

Este tipo de resinas se caracteriza por el hecho de que parte de su contenido se obtiene de recursos renovables, a diferencia de las resinas convencionales que se obtienen de derivados del petróleo. Los aceites vegetales (VO, vegetable oils) han ganado gran relevancia debido a su potencial en la fabricación de

materiales de base biológica [14, 15]. La estructura básica de estos aceites vegetales está basada en una estructura triglicérida compuesta de tres ácidos grasos diferentes, adjuntos químicamente a un esqueleto de glicerol. Algunos de estos ácidos grasos, tales como los ácidos oleico, linoleico y linolénico, contienen uno, dos o tres carbonos no saturados, respectivamente, lo que permite la modificación selectiva de los VO con diferentes funcionalidades químicas. Los VO pueden ser epoxidados, maleinizados, hidroxilados, acrilados y así sucesivamente, para obtener resinas con base biológica parcial. Estas resinas «inocuas para el medio ambiente» han sido desarrolladas de manera tal que sus propiedades mecánicas y térmicas son similares a sus contrapartes petroquímicas, para que puedan competir con resinas termoestables derivadas del petróleo, con la característica adicional de su origen renovable [13].

Una alternativa al uso de fibras sintéticas y de lana de roca en la fabricación de materiales compuestos de alto desempeño, es reemplazar total o parcialmente algunas de estas fibras y/o tejidos con fibras naturales. Muchos investigadores han enfocado sus estudios en el desarrollo de materiales compuestos híbridos con fibras convencionales y naturales. Las fibras naturales tales como cáñamo, lino y hoja de palma son las más utilizadas, y ofrecen propiedades balanceadas interesantes [16, 17]. Una fibra que destaca por sus excelentes propiedades mecánicas, debido a su composición y estructura es el lino [9]. Sin embargo, los compuestos completamente de lino no pueden competir con materiales compuestos de alto desempeño. Es por esto por lo que la fabricación de estructuras compuestas híbridas se ha convertido en una alternativa interesante, para encontrar un balance entre inquietudes ambientales y propiedades técnicas.

Dado que las fibras naturales no pueden competir con las fibras de alta tecnología como carbonos o aramidas, es muy común combinar fibras naturales con fibras minerales, las cuales son más rentables en comparación con las fibras de alta tecnología. Las fibras de basalto han sido utilizadas en materiales compuestos termoplásticos y termoestables, como una alternativa a la fibra de vidrio. Estas fibras son obtenidas a partir de rocas de basalto, que son unas de las más abundantes sobre la superficie terrestre. Su estructura es bastante similar a la de la fibra de vidrio, pero con diferente contenido de sílice y alúmina. A diferencia de la fibra de vidrio, el proceso de producción de la fibra de basalto es más sencillo, más eficiente y no genera desecho, debido a la estructura simple. Barouni y Dhakal [18] han desarrollado compuestos híbridos lino/vidrio con una mejora en las características de daño por impacto, debido a la capacidad de las fibras de lino de absorber la energía del impacto. Por otra parte, Mazur *et al.* [19] estudiaron el efecto híbrido de compuestos basados en fibras de basalto y carbono, donde se reportó un incremento en la resistencia y en

el módulo de elasticidad cuando la masa compartida de las fibras era cerca del 7 % en peso.

Entre los materiales compuestos híbridos, es valioso resaltar el interés en los paneles tipo sándwich. Estos han sido utilizados en áreas donde se requiere mayor espesor, menor peso, alta rigidez y capacidad de aislamiento. Estos son utilizados generalmente en las áreas de construcción, automotriz, aviación, y así sucesivamente, debido a su extraordinaria capacidad de soportar fuerzas de flexión (fuera-del-plano) [20]. Los paneles tipo sándwich están compuestos por dos láminas externas (chapas superficiales), y un núcleo que en general tiene propiedades inferiores que las láminas superficiales, pero contribuye a soportar las fuerzas fuera-del-plano por los esfuerzos con las láminas externas.

Usualmente, las láminas superficiales son chapas compuestas con varias capas con tejidos orientados en diferentes direcciones, para mejorar el comportamiento de la isotropía [21]. Frecuentemente, estas láminas superficiales consisten de chapas de poliéster no saturado (UP, unsaturated polyester) con fibras de vidrio (GF, glass fibers) para aplicaciones con desempeño mecánico moderado, o capas epoxi (EP, epoxy) con fibras de carbono (CF, carbon fibers) y/o aramida (AF, aramid fibers) para aplicaciones con alta exigencia mecánica [22, 23]. Usualmente, el núcleo está hecho de materiales con baja densidad y características mecánicas relativamente pobres, debido a que su propósito no es soportar resistencia mecánica. Los materiales del núcleo ofrecen alta ligereza y muy buena capacidad de absorción de los esfuerzos de corte. Algunos de los núcleos ampliamente utilizados incluyen madera de balsa, poliuretano, o estructuras de panal [24–26]. La fabricación de paneles tipo sándwich compuestos, se lleva a cabo usualmente mediante laminado manual y envasado al vacío.

En años recientes, algunos estudios de investigación se han enfocado en el desarrollo de núcleos que no solo sean parte del panel tipo sándwich, sino que también contribuyan a mejorar los procesos de fabricación. El moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM, vacuum assisted resin infusion moulding) es una técnica ampliamente utilizada, y es una alternativa al proceso industrial de moldeado por transferencia de resina (RTM, resin transfer moulding) para obtener de manera simple, materiales compuestos con excelentes propiedades balanceadas. Sin embargo, el proceso VARIM requiere diferentes consumibles (boquilla de infusión, malla de purga, tubo espiral, y así sucesivamente), y no es el mejor proceso de fabricación para paneles tipo sándwich porque los núcleos típicos no transfieren la resina infundada.

Recientemente se han desarrollado nuevos núcleos con características multifuncionales. Por una parte, ellos pueden actuar como materiales núcleo en estructuras tipo sándwich, y por otra parte ofrecen suficiente

porosidad para mejorar la infusión de resina a través de ellos. Algunos de estos núcleos están compuestos por una estructura de celda separada por canales con microesferas sintéticas, las cuales no absorben resinas; este canal ayuda a que la resina fluya a través del material compuesto [27]. Chatys *et al.* [28] han utilizado Lantor Soric® en compuestos tipo sándwich con fibras de carbono para fabricar parachoques de seguridad para vehículos, debido a su flexibilidad y su capacidad de absorber la energía de impacto en comparación con partes metálicas convencionales. Eum *et al.* [29] han reportado que al utilizar el núcleo como un medio de infusión en un proceso VARTM convencional, es posible proporcionar propiedades similares a compuestos similares, dado que estos no capturan la resina y ayudan a corregir su flujo.

Los materiales compuestos híbridos, debido a la naturaleza diversa de sus componentes, usualmente no tienen la sinergia requerida, dado que los esfuerzos no son transferidos correctamente a las fibras de refuerzo, que generalmente son el material más resistente. En general, se han desarrollado varios métodos para mejorar la interacción en la intercara entre las fibras y la resina. El método más utilizado es el tratamiento químico con silanos adaptados. Los silanos ofrecen funcionalidad dual, que les permite reaccionar primero con la superficie de la fibra, y durante el entrecruzamiento, pueden reaccionar con la resina, produciendo así puentes químicos reales entre la matriz termoestable y las fibras de refuerzo [30, 31].

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de estructuras tipo sándwich novedosas y altamente livianas, utilizando fibras de basalto y lino como fibras de refuerzo. Un poliéster no tejido con celdas hexagonales se ha utilizado como el material núcleo, para evaluar el potencial de fabricación de paneles tipo sándwich compuestos, a través de un moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM, vacuum assisted resin infusion moulding) convencional, utilizando el núcleo como medio de infusión. Los paneles tipo sándwich obtenidos han sido caracterizados en condiciones de flexión e impacto, para entender las propiedades de resistencia y el efecto del tratamiento con silano. Luego se realiza una FESEM para analizar la interacción en la intercara entre las fibras de refuerzo y la resina epoxi de base parcialmente biológica.

2. Experimental

2.1. Materiales

Una resina epoxi de grado comercial de base parcialmente biológica (31 % de contenido renovable de acuerdo con ASTM D6866-12) fue utilizada como la matriz termoestable. Esta consistió de una resina epoxi base Resoltech® 1070 ECO, y un endurecedor basado en amina grado Resoltech® 1074 ECO de Castro Com-

posites (Pontevedra, España). La proporción resina a endurecedor fue 100/35 partes por peso, como lo recomienda el fabricante. El sistema fue mezclado profundamente por métodos manuales hasta obtener una mezcla uniforme.

Se utilizaron dos tejidos de refuerzo diferentes. Por un lado, tejido de basalto BAS 940.1270 de Basaltex® (Wevelgem, Bélgica), hecho de 100 % de filamentos de basalto continuos. Este tejido muestra un peso específico superficial de 940 g/cm² y un espesor de 0.54 mm. Por otro lado, tejido de lino Biotex® Flax fue obtenido de Composites Evolution (Chesterfield, Reino Unido), con un peso específico superficial 400 g/cm² y un espesor de 0.7 mm.

El material núcleo fue un Lantor Soric® XF suministrado por LANTOR® (Veenendaal, Los Países Bajos), no tejido y con peso específico superficial 250 g/cm². Este fue utilizado como material núcleo y medio de infusión. Para mejorar la interacción en la intercara entre las fibras/tejidos seleccionados y la matriz epoxi, un silano glicidil-funcional (3-glicidiloxipropilo) trimetoxisilano se utilizó como agente de acoplamiento. Este fue suministrado por Sigma-Aldrich (Madrid, España).

2.1.1. Pretratamiento de tejidos

En general, las fibras de basalto se cubren con un encolado basado en silano, para proporcionar hebras que puedan interferir con el proceso de producción de los paneles. Para remover dicho encolado y cualesquiera impurezas externas, las fibras de basalto fueron inicialmente sometidas a un tratamiento térmico a 300 °C por 3 horas.

La interacción en la intercara entre los tejidos y la matriz fue mejorada por un tratamiento de silanización. Tanto las fibras de basalto como las de lino fueron sumergidas en una solución acuosa de silano al 1 % en peso, durante 2 horas a temperatura ambiente; luego la solución fue agitada con un agitador magnético para obtener una solución uniforme. Durante esta etapa ocurre la hidrólisis del silano, y los grupos posteriores de hidroxilo se mueven a la superficie de los tejidos.

Para completar el proceso de silanización de anclaje químico a través de condensación de los silanos con los hidroxilos en la superficie de ambas fibras, un horno de aire circulante fue utilizado para secar las fibras funcionalizadas por 12 horas a 80 °C. Esta etapa proporciona enlaces fuertes entre los grupos hidrolizados de silano y el grupo hidroxilo en los tejidos tanto de basalto como de lino, a través de un proceso de condensación con la liberación de agua que se elimina por evaporación.

2.1.2. Fabricación de laminados compuestos híbridos basalto/lino

El proceso utilizado para la fabricación de los laminados tipo sándwich híbridos fue el moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM), en vez de utilizar el proceso usual con tejido de purga, malla de absorción, y así sucesivamente, que no son la mejor selección para fabricar paneles tipo sándwich compuestos.

Los paneles tipo sándwich fueron obtenidos con núcleo Soric®, que actuó como medio poroso para infusión. Como en otros métodos de infusión, el vacío es responsable de propagar la resina a través de la geometría del sándwich compuesto, y evita la aglomeración de resina en los tejidos.

Se fabricaron diferentes secuencias de apilamiento, como puede verse en la Tabla 1. El procedimiento fue el siguiente. Primero, una superficie plana fue limpiada con antelación, y luego cubierta con una capa fina de un agente de liberación poli(alcohol vinílico)-PVA. Segundo, una lámina pelable fue colocada sobre la fina capa de PVA, para hacer más accesible el proceso de desmoldado. Luego los tejidos y el núcleo fueron apilados como se indica en la Tabla 1 y en la Figura 1(a). A partir de este paso, el proceso es ligeramente diferente al de una infusión convencional de resina (VARIM). Como puede verse en la Figura 1(b), la malla de purga en vez de cubrir todo el apilamiento, solo se coloca en el lado donde estará ubicada la entrada de resina, la cual es responsable de asegurar el flujo de resina desde la entrada al núcleo. Mientras tanto, el tubo de distribución de resina fue colocado sobre la malla, y el tubo de vacío fue cubierto con una lámina de fieltro que permitía el vacío, pero restringía el flujo de resina. Finalmente, todos los elementos fueron sellados con una bolsa plástica y una cinta de embalar de doble cara (Figura 1(c)). Para asegurar que no hubiese fuga de resina, el vacío fue probado previamente. Luego, se permitió a la resina fluir hasta que todas las láminas estuvieran completamente empapadas. Luego de esto, se cortó el suministro de resina, pero el vacío se mantuvo por 8 horas hasta que la resina estuviera completamente curada a temperatura ambiente. Con estas condiciones de curado, no es necesario ningún proceso adicional posterior a la cura. Como puede verse en la Figura 1(d), el núcleo ayuda a la resina a fluir a través del panel tipo sándwich. Las fibras de lino fueron las que mejor absorbieron la resina, debido a su estructura porosa, seguidas por las fibras de basalto. El Soric® Lantor ayuda a que la resina sea propagada de manera homogénea a través de las láminas superficiales, lo cual conduce a que el panel compuesto se moje completamente.

Los paneles obtenidos fueron maquinados con una fresadora con control numérico computarizado, para obtener especímenes que siguen los estándares internacionales.

Tabla 1. Composición y codificación de los paneles tipo sándwich compuestos basalto/lino

Código	Proporción en el número de capas (basalto/lino)	Cara superior del sándwich	Núcleo	Cara superior del sándwich	Fracción volumétrica resina/material
BBSBB	4/0	basalto – basalto	Soric® XF	basalto – basalto	52.20/47.80
BLSLB	2-feb	basalto – lino	Soric® XF	lino – basalto	62.62/37.38
LBSBL	2-feb	lino – basalto	Soric® XF	basalto – lino	63.10/36.90
LLSLL	0/4	lino – lino	Soric® XF	lino – lino	74.76/25.24
BSB	2/0	basalto	Soric® XF	basalto	58.86/41.14
LSL	0/2	lino	Soric® XF	lino	77.64/22.36

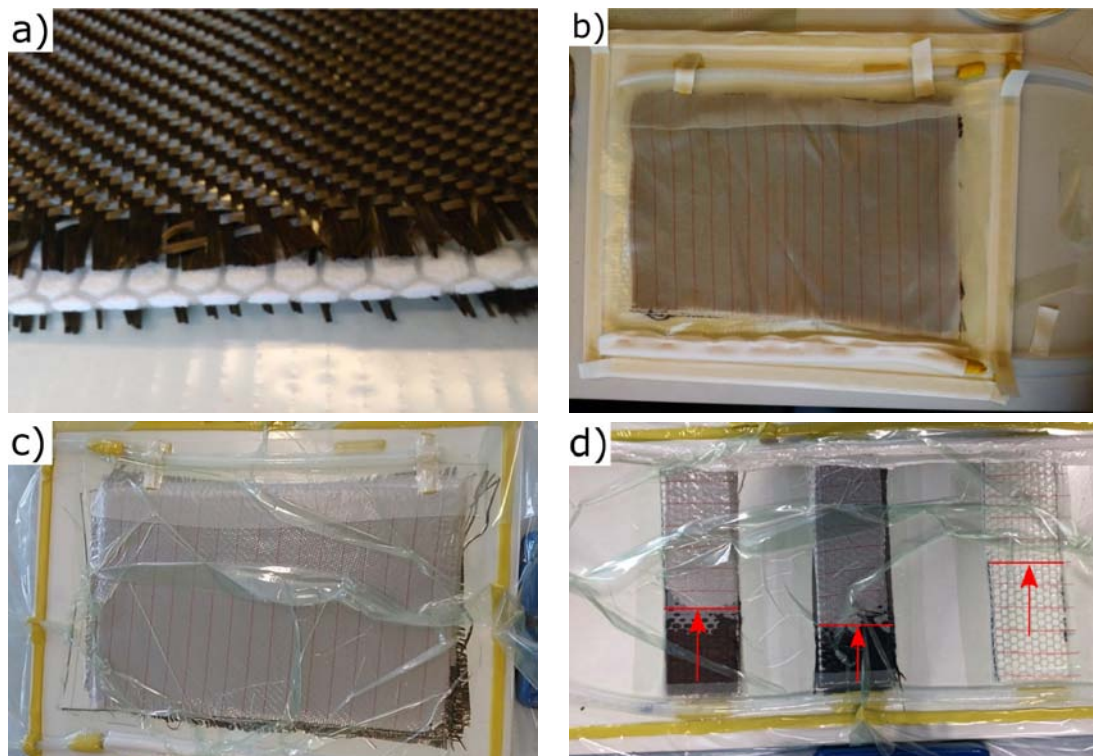


Figura 1. Esquema del proceso de fabricación de compuestos tipo sándwich basalto/lino por moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM) con núcleo no tejido como medio de infusión. a) configuración del apilamiento, b) ubicación de los tubos de entrada y salida de la resina, c) proceso de sellado y procedimiento de prueba del vacío, d) proceso de infusión de resina con diferentes secuencias de apilamiento.

2.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich fueron determinadas en condiciones de flexión e impacto. Los ensayos de flexión fueron realizados en una máquina universal de prueba ELIB 30 de S. A. E. Ibertest (Madrid, España), siguiendo lineamientos del estándar ISO 14125:1998. En este ensayo, el espécimen es apoyado en dos puntos separados entre sí, y la carga creciente se aplica en el centro a una tasa de cruce de 1 mm/min. La máquina estaba equipada con una celda de carga de 5 kN.

Para evaluar la resistencia al impacto de los paneles tipo sándwich, el ensayo Charpy fue realizado en un péndulo de Charpy suministrado por Metrotec (San Sebastián, España), utilizando un péndulo de 6-J sobre muestras con muescas tipo «U» (radio de 0.5 mm y profundidad de 2 mm), siguiendo lineamientos del estándar ISO 179. Al menos cinco muestras de cada material fueron ensayadas a temperatura ambiente; los resultados de todos los ensayos fueron recogidos y promediados. Adicionalmente, se obtuvo la desviación estándar para estimar el error.

2.3. Análisis de la interacción en la intercara por medio de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM, field emission scanning electron microscopy)

Para evaluar la interacción en la intercara entre las fibras de refuerzo y la matriz epoxi, las muestras fueron criofracturadas, y luego observadas por medio de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), en un microscopio ZEISS ULTRA 55 FE-SEM suministrado por Oxford Instruments (Abingdon, Reino Unido) trabajando con un voltaje de aceleración de 2 kV. Para proporcionar propiedades de conducción eléctrica a los paneles tipo sándwich, estos fueron previamente recubiertos con una capa de oro/paladio utilizando un revestidor de pulverización de alto vacío EM MED20 suministrado por Leica Microsystems (Milton Keynes, Reino Unido).

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich basados en fibras de basalto y lino

Someter los paneles tipo sándwich de basalto/lino a condiciones de flexión e impacto (ensayo de Charpy) proporciona datos interesantes acerca de las propiedades resistentes, así como también sobre la capacidad de absorber energía en condiciones de impacto. La Figura 2 muestra los valores obtenidos en los dos ensayos descritos. En materiales sándwich, el núcleo no ofrece ninguna resistencia mecánica al material (en condiciones de tracción), por lo que las propiedades finales están basadas estrictamente en las fibras de refuerzo. No obstante, los materiales núcleo contribuyen a soportar esfuerzos fuera-del-plano por corte con las láminas superficiales.

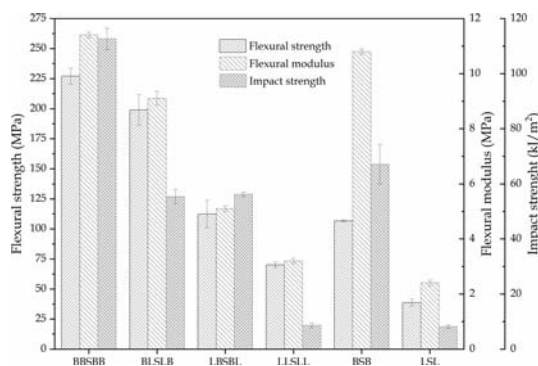


Figura 2. Propiedades mecánicas del panel tipo sándwich híbrido compuesto de basalto/lino con diferentes secuencias de apilamiento, obtenidas de ensayos de flexión e impacto.

Como era de esperarse, el material BBSBB con el número más alto de capas de basalto en su estructura (4 láminas de basalto, dos por encima del núcleo y

dos por debajo), muestra una resistencia a la flexión σ_f y un módulo de flexión E_f de 227 ± 6.79 MPa y 11.35 ± 0.037 GPa, respectivamente. Estos valores son similares a otros materiales compuestos de fibra de vidrio. Los valores obtenidos son relativamente altos, lo que significa que, además del hecho de que las fibras de basalto tienen alta resistencia, la interacción entre estas fibras y el material epóxico es bastante buena, permitiendo una excelente transferencia de carga desde la matriz a las fibras. Estos resultados están en concordancia con la literatura acerca de sistemas basalto/epoxi [32].

El análisis de materiales tales como BLSLB y LBSBL, que tienen el mismo número de capas de fibras de basalto y lino en las láminas superficiales (una capa de basalto y una capa de lino en cada lámina superficial), pero con diferente configuración de apilamiento, da resultados impresionantes. El panel con las capas de basalto en el lado externo de las láminas superficiales ofrece valores más altos de resistencia a la flexión y módulo de flexión, que son solo 12 % y 19 % menor, respectivamente, en comparación con el material con cuatro capas de basalto. La secuencia de apilamiento BLSLB conduce a propiedades mecánicas interesantes de 199 ± 12.7 MPa y 9.14 ± 0.25 GPa para la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, respectivamente.

Con respecto al material LBSBL, es valioso remarcar la notoria disminución en las propiedades a flexión tanto en resistencia como en rigidez, específicamente reducciones de 43 y 44 % en la resistencia a la flexión y en el módulo de flexión, respectivamente, en comparación con el panel compuesto BBSBB. Esto es claramente debido a la naturaleza de las fibras que están soportando los esfuerzos de tracción y compresión. En el panel compuesto LBSBL, las fibras de lino están localizadas en la cara externa. Dado que las fibras de lino son menos resistentes que las fibras de basalto, el resultado es una disminución notable en sus propiedades. Resultados similares fueron obtenidos por Dhakal *et al.* [33] en compuestos híbridos reforzados basados en fibras de basalto/cáñamo; la presencia de fibras de basalto en el lado externo de las láminas superficiales mejoró la resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

Como era de esperarse, los paneles compuestos completamente por fibras de lino son los que tienen peores propiedades a flexión. La Figura 3 muestra un ejemplo del tipo de falla que sufrieron los paneles. La Figura 3(a) muestra el material BSB que está compuesto únicamente de una capa de basalto en cada una de las superficies; como se mencionó anteriormente, el núcleo utilizado no proporciona ninguna resistencia extra al material final. Puede observarse que la falla del material es causada por el núcleo y no por las fibras de refuerzo. Por otra parte, la Figura 3(b) indica que la falla del material LSL se debe a la baja resistencia de las fibras de lino en la lámina superficial inferior, que está trabajando en condiciones de tracción.

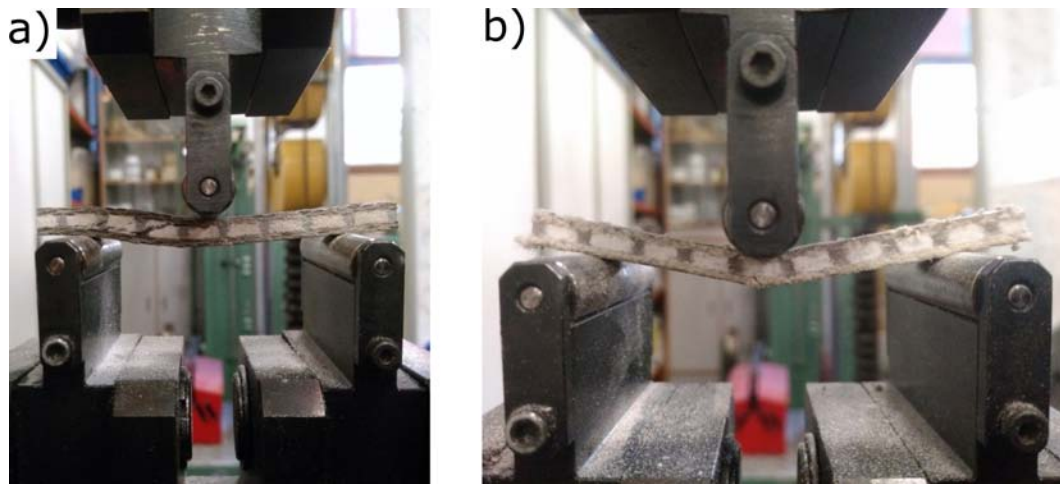


Figura 3. Formas de falla en ensayos de flexión del a) panel sándwich BSB y b) panel sándwich LSL.

Utilizando el ensayo de impacto de Charpy, puede estimarse la energía que tales materiales pueden soportar bajo condiciones de impacto, lo que da una estimación de la dureza.

Tal como ocurrió en la caracterización a la flexión, el material compuesto completamente de fibras de basalto (con un núcleo Soric® Lantor), esto es el BB-SBB, es uno de los que absorbe la mayor energía al obtenerse valores de $112.6 \pm 3.9 \text{ kJ/m}^2$, lo cual indica una buena transferencia de esfuerzo desde la matriz a los tejidos de refuerzo.

Las fibras de basalto, debido a su composición, proporcionan alta rigidez al compuesto, pero, en contraste, los compuestos de basalto no pueden soportar grandes deformaciones [34]. Analizando los paneles compuestos con el mismo número de fibras de basalto y lino (BLSLB y LBSBL), puede verse que la distribución de las fibras no afecta la energía al impacto (ver Figura 2), con valores de energía absorbida de $55\text{--}56 \text{ kJ/m}^2$, que están en concordancia con los resultados reportados por Fiore *et al.* [35]. Ellos observaron cambios leves en la resistencia al impacto, al colocar fibras de basalto y lino en la lámina superficial externa.

Como era de esperarse, con solo reemplazar una capa de basalto por lino, la resistencia al impacto se reduce en cerca de 50 %. Esto es consistente, porque se observa que el material BSB formado por una única capa de basalto en las láminas superficiales tiene una resistencia más alta al impacto que materiales que tienen fibra de lino en su secuencia de apilamiento. Puede concluirse que el esfuerzo de impacto es absorbido casi completamente por las fibras de basalto, porque al analizar materiales que están completamente hechos de fibras de lino, bien sea por cuatro capas (LL-SLL) o dos capas (LSL), estos tienen valores muy bajos y prácticamente iguales, alrededor de 8 kJ/m^2 . Como se mencionó anteriormente, el núcleo no mejora las propiedades finales de los materiales compuestos.

3.2. Interacción en la intercara matriz/fibras de refuerzo

Las propiedades finales de los materiales compuestos híbridos están relacionadas a la resistencia de las fibras; por lo tanto, es necesaria una buena sinergia entre estas y la matriz, debido a que una interacción funcional entre las fibras y la matriz resultará en propiedades mecánicas superiores. Esto es porque las buenas interacciones fibra-matriz permiten la transferencia de esfuerzos desde la matriz (sin propiedades de refuerzo) a las fibras de refuerzo [36]. Por tanto, una pobre sinergia entre estos componentes resultaría en materiales compuestos con propiedades mecánicas inferiores.

Por un análisis preciso de la interacción entre las fibras de refuerzo y la matriz circundante, se observaron mediante FESEM en las áreas crio fracturadas en las láminas superficiales (ver Figura 4). La Figura 4(a) muestra la interacción entre las fibras de basalto luego del tratamiento con el agente de acoplamiento basado en silano, y la matriz circundante. Como puede observarse, no existe la brecha entre la fibra y la resina circundante, lo que indica que el tratamiento de silano fue exitoso. Hallazgos similares fueron reportados por Gao *et al.* [37] en fibras basadas en sílice (fibras de vidrio) y una matriz epoxi. Estos muestran la efectividad de un tratamiento de silanización en las fibras, que está directamente relacionado con las propiedades mecánicas mejoradas. La Figura 4(b) muestra las fibras de lino después de que son sometidas al mismo tratamiento químico con el agente de acoplamiento de silano. En este caso se muestra que la interacción de las fibras fue mejorada, porque la brecha es muy pequeña. Esta mejora también ha sido reportada por Sepe y Caputo [38], con fibras de cáñamo sometidas a un proceso de silanización con (3-glicidiloxipropilo) trimetoxisilano como agente de acoplamiento.

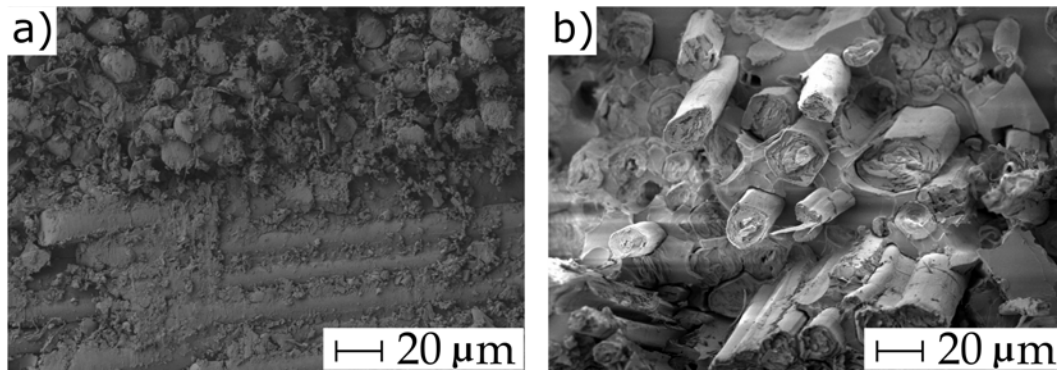


Figura 4. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) a aumentos $\times 500$, correspondientes a superficies crio fracturadas por ensayos de impacto del a) panel sándwich BSB y b) panel sándwich LSL.

Este agente de acoplamiento también disminuye el comportamiento hidrofílico intrínseco que tienen las fibras naturales, y esto mejora la compatibilidad con matrices poliméricas hidrofóbicas. A pesar de esto, la presencia de la brecha no permite una transferencia perfecta del esfuerzo, por lo que las propiedades mecánicas finales declinarán. Dado que la estructura de las fibras de basalto está basada en sílice, la efectividad de la silanización con silano hidrolizado funciona mejor. La funcionalidad del agente de acoplamiento glicidil-silano tiene grupos funcionales epoxi, que pueden reaccionar fácilmente tanto con la resina epoxi durante el proceso de curado (entrecruzamiento) como con los grupos funcionales hidroxilo de las fibras de basalto, conduciendo a un puente fuerte entre estos dos componentes.

Esto corrobora los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, porque la mejoría de las propiedades a flexión de los paneles reforzados por fibras de basalto es el resultado de la buena sinergia entre estas fibras y la matriz polimérica, lo que permite una excelente distribución del esfuerzo.

4. Conclusiones

Finalizada esta investigación, se ha confirmado que el uso de un núcleo poroso como un medio de difusión en un moldeado por infusión de resina asistida por vacío (VARIM) convencional, es un proceso alternativo exitoso para fabricar estructuras compuestas livianas tipo sándwich, utilizando una resina epoxi con base biológica parcial (con 31 % en peso de contenido de base biológica derivado de aceites vegetales epoxidados). El uso de un material núcleo de infusión permite reducir el peso y los costos de fabricación de partes compuestas de alta tecnología, dado que los materiales consumibles típicos en un proceso VARIM pueden ser reducidos.

Los silanos desempeñan un papel clave en la mejoría del desempeño mecánico, dado que proporcionan enlaces fuertes entre la resina epoxi (a través del grupo funcional glicidil) y la fibra (a través de un proceso de

condensación del silano hidrolizado).

En relación con las propiedades mecánicas de los paneles tipo sándwich, el mejor desempeño se obtiene en materiales compuestos con la secuencia de apilamiento BBSBB. Sin embargo, la sustitución de uno de los tejidos de basalto en las láminas superficiales por tejido de lino tiene un efecto esencial en las propiedades globales, principalmente en la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, mientras que la resistencia al impacto se mantiene casi invariable. A pesar de que estos paneles compuestos basados en lino ofrecen propiedades inferiores que los compuestos completamente de basalto, ellos representan una alternativa interesante tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista ambiental.

Referencias

- [1] P. Cousin, M. Hassan, P. V. Vijay, M. Robert, and B. Benmokrane, "Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in frp reinforcing bars," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 26–27, pp. 3651–3670, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0021998319844306>
- [2] B. Wang, Q. Fu, H. Li, L. Qi, Q. Song, and Y. Fu, "In situ growth of graphene on carbon fabrics with enhanced mechanical and thermal properties for tribological applications of carbon fabric-phenolic composites," *Tribology Transactions*, vol. 62, no. 5, pp. 850–858, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1626519>
- [3] K. Liu, S. He, Y. Qian, Q. An, A. Stein, and C. W. Macosko, "Nanoparticles in glass fiber-reinforced polyester composites: Comparing toughening effects of modified graphene oxide and core-shell rubber," *Polymer Composites*, vol. 40, no. S2, pp. E1512–E1524, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pc.25065>

- [4] M. S. Z. Abidin, T. Herceg, E. S. Greenhalgh, M. Shaffer, and A. Bismarck, "Enhanced fracture toughness of hierarchical carbon nanotube reinforced carbon fibre epoxy composites with engineered matrix microstructure," *Composites Science and Technology*, vol. 170, pp. 85–92, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.017>
- [5] M. Flanagan, A. Doyle, K. Doyle, M. Ward, M. Bizeul, R. Canavan, B. Weafer, C. M. Brádaigh, N. M. Harrison, and J. Goggins, "Comparative manufacture and testing of induction welded and adhesively bonded carbon fibre peek stiffened panels," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 32, no. 12, pp. 1622–1649, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705718792362>
- [6] M. R. Ricciardi, I. Papa, V. Antonucci, V. Lopresto, and A. Langella, "Impact behavior of polyester gfrp for naval applications: Influence of the clamping device and fluid-material interaction," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, no. 6, pp. 3196–3202, Jun 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03902-w>
- [7] J. Naveen, M. Jawaid, E. S. Zainudin, M. T. H. Sultan, and R. Yahaya, "Effect of graphene nanoplatelets on the ballistic performance of hybrid kevlar/cocos nucifera sheath-reinforced epoxy composites," *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 21–22, pp. 4349–4362, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0040517519833970>
- [8] J. P. Arenas, J. L. Castaño, L. Troncoso, and M. L. Auad, "Thermoplastic polyurethane/laponite nanocomposite for reducing impact sound in a floating floor," *Applied Acoustics*, vol. 155, pp. 401–406, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.06.012>
- [9] M. Zhang, O. Bareille, and M. Salvia, "Cure and damage monitoring of flax fiber-reinforced epoxy composite repairs for civil engineering structures using embedded piezo micro-patches," *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 196–203, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.179>
- [10] M. Mudhukrishnan, P. Hariharan, K. Palanikumar, and B. Latha, "Optimization and sensitivity analysis of drilling parameters for sustainable machining of carbon fiber-reinforced polypropylene composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 32, no. 11, pp. 1485–1508, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705718799816>
- [11] R. M. Gandia, F. C. Gomes, A. A. R. Corrêa, M. C. Rodrigues, and R. F. Mendes, "Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste," *Construction and Building Materials*, vol. 222, pp. 168–182, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>
- [12] A.-S. Mora, R. Tayouo, B. Boutevin, G. David, and S. Caillol, "Synthesis of biobased reactive hydroxyl amines by amination reaction of cardanol-based epoxy monomers," *European Polymer Journal*, vol. 118, pp. 429–436, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.06.020>
- [13] C. François, S. Pourchet, G. Boni, S. Rautainen, J. Samec, L. Fournier, C. Robert, C. M. Thomas, S. Fontaine, Y. Gaillard, V. Placet, and L. Plasseraud, "Design and synthesis of biobased epoxy thermosets from biorenewable resources," *Comptes Rendus Chimie*, vol. 20, no. 11, pp. 1006–1016, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2017.10.005>
- [14] S. Torron, S. Semlitsch, M. Martinelle, and M. Johansson, "Biocatalytic synthesis of epoxy resins from fatty acids as a versatile route for the formation of polymer thermosets with tunable properties," *Biomacromolecules*, vol. 17, no. 12, pp. 4003–4010, 2016, PMID: 27809488. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b01383>
- [15] M. Jebrane, S. Cai, C. Sandström, and N. Terziev, "The reactivity of linseed and soybean oil with different epoxidation degree towards vinyl acetate and impact of the resulting copolymer on the wood durability," 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.37>
- [16] R. Singh, B. Singh, and H. Tarannum, "Mechanical properties of jute fiber-reinforced up/pu hybrid network composites," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 27, no. 9, pp. 546–556, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0967391119852882>
- [17] E. Mahdi, D. Ochoa, A. Vaziri, and E. Eltai, "Energy absorption capability of date palm leaf fiber reinforced epoxy composites rectangular tubes," *Composite Structures*, vol. 224, p. 111004, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111004>
- [18] A. K. Barouni and H. N. Dhakal, "Damage investigation and assessment due to low-velocity impact on flax/glass hybrid composite plates," *Composite Structures*, vol. 226, p. 111224, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111224>

- [19] K. Mazur, S. Kuciel, and K. Salasinska, "Mechanical, fire, and smoke behaviour of hybrid composites based on polyamide 6 with basalt/carbon fibres," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 28-30, pp. 3979–3991, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0021998319853015>
- [20] J. R. Vinson, "Sandwich structures: Past, present, and future," in *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2005, pp. 3–12. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/1-4020-3848-8_1
- [21] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen, and I. Zuardy, "Sandwich structures technology in commercial aviation," in *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, O. Thomsen, E. Bozhevolnaya, and A. Lyckegaard, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, pp. 13–26. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/1-4020-3848-8_2
- [22] A. Atiqah, M. T. Mastura, B. A. Ahmed Ali, M. Jawaid, and S. M. Sapuan, "A review on polyurethane and its polymer composites," *Current Organic Synthesis*, vol. 14, pp. 233–248, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2174/1570179413666160831124749>
- [23] M. Yaqoob, "Fabrication and structural equivalency analysis of cfrp nomex core sandwiched panels for fsae race car," *The UNSW Canberra at ADFA Journal of undergraduate engineering research*, vol. 12, no. 2, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LGQHUY>
- [24] C. Atas and C. Sevim, "On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and pvc foam," *Composite Structures*, vol. 93, no. 1, pp. 40–48, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.06.018>
- [25] G. Zhang, B. Wang, L. Ma, L. Wu, S. Pan, and J. Yang, "Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 304–310, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.040X>
- [26] L. He, Y.-S. Cheng, and J. Liu, "Precise bending stress analysis of corrugated-core, honeycomb-core and x-core sandwich panels," *Composite Structures*, vol. 94, no. 5, pp. 1656–1668, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.12.033>
- [27] R. Stewart. (2011) Sandwich composites excel at cost-effective, lightweight structures. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YAF3Q5>
- [28] R. Chatys, A. Panich, R. S. Jurecki, and M. Kleinhofs, "Composite materials having a layer structure of "sandwich" construction as above used in car safety bumpers," in *2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety*, April 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373320>
- [29] S. H. Eum, Y. H. Kim, J. W. Han, K. J. Kim, D. H. Shin, C. Yim, and R. Murakami, "A study on the mechanical properties of the honeycomb sandwich composites made by var-tm," in *Advances in Fracture and Strength*, ser. Key Engineering Materials, vol. 297. Trans Tech Publications Ltd, 8 2005, pp. 2746–2751. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.297-300.2746>
- [30] J. M. España, M. D. Samper, E. Fages, L. Sánchez-Nácher, and R. Balart, "Investigation of the effect of different silane coupling agents on mechanical performance of basalt fiber composite laminates with biobased epoxy matrices," *Polymer Composites*, vol. 34, no. 3, pp. 376–381, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pc.22421>
- [31] M. D. Samper, R. Petrucci, L. Sánchez-Nacher, R. Balart, and J. M. Kenny, "New environmentally friendly composite laminates with epoxidized linseed oil (elo) and slate fiber fabrics," *Composites Part B: Engineering*, vol. 71, pp. 203–209, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.034>
- [32] R. Petrucci, C. Santulli, D. Puglia, F. Sarasini, L. Torre, and J. M. Kenny, "Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion," *Materials & Design*, vol. 49, pp. 728–735, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.014>
- [33] H. N. Dhakal, F. Sarasini, C. Santulli, J. Tirilló, Z. Zhang, and V. Arumugam, "Effect of basalt fibre hybridisation on post-impact mechanical behaviour of hemp fibre reinforced composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 75, pp. 54–67, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.020>
- [34] S. Boccardi, N. D. Boffa, G. M. Carlomagno, G. D. Core, C. Meola, P. Russo, and G. Simeoli, "Inline monitoring of basalt-based composites under impact tests," *Composite Structures*, vol. 210, pp. 152–158, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.038>

- [35] V. Fiore, T. Scalici, L. Calabrese, A. Valenza, and E. Proverbio, "Effect of external basalt layers on durability behaviour of flax reinforced composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 84, pp. 258–265, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.087>
- [36] D. Lascano, L. Quiles-Carrillo, S. Torres-Giner, T. Boronat, and N. Montanes, "Optimization of the curing and post-curing conditions for the manufacturing of partially bio-based epoxy resins with improved toughness," *Polymers*, vol. 11, no. 8, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym11081354>
- [37] X. Gao, R. E. Jensen, W. Li, J. Deitzel, S. H. McKnight, and J. R. J.W. Gillespie, "Effect of fiber surface texture created from silane blends on the strength and energy absorption of the glass fiber/epoxy interphase," *Journal of Composite Materials*, vol. 42, no. 5, pp. 513–534, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0021998307086203>
- [38] P. K. Kushwaha and R. Kumar, "Effect of silanes on mechanical properties of bamboo fiber-epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 5, pp. 718–724, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0731684408100691>



ESTIMADOR DE CANAL BASADO EN SENSADO COMPRESIVO Y LDPC PARA OFDM USANDO SDR

COMPRESSIVE SENSING BASED CHANNEL ESTIMATOR AND LDPC THEORY FOR OFDM USING SDR

Anthony Yanza-Verdugo¹, Christian Pucha-Cabrera¹ y Juan Inga-Ortega^{2,*}

Resumen

Este trabajo propone la aplicación de un estimador de canal basado en sensado compresivo (CS, del inglés *Compressive Sensing*) sobre un sistema que usa multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) usando dispositivos de radio definido por software (SDR, del inglés *Software Defined Radio*). La aplicación de la teoría de CS se da a través del uso de algoritmos de reconstrucción dispersa como *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) y *Compressive Sampling Matching Pursuit* (CoSaMP) con el fin de aprovechar la naturaleza dispersa de las subportadoras piloto usadas en OFDM optimizando el ancho de banda del sistema. Además, para mejorar el rendimiento de estos algoritmos, se utiliza el concepto de la matriz de comprobación de paridad dispersa que se implementa en el despliegue de códigos de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC, del inglés *Low Density Parity Check*) para obtener una matriz de sensado que mejore la propiedad de restricción isométrica (RIP, del inglés *Isometric Restriction Property*) perteneciente al paradigma de CS. El documento muestra el modelo implementado en los equipos SDR analizando la tasa de error de bit y la cantidad de símbolos piloto usados.

Palabras clave: estimación de canal, LDPC, OFDM, SDR, sensado compresivo.

Abstract

This work proposes the application of a channel estimator based on Compressive Sensing (CS) over a system that uses Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) using Software Defined Radio (SDR) devices. The application of the CS theory is given through the use of sparse reconstruction algorithms such as Orthogonal Matching Pursuit (OMP) and Compressive Sampling Matching Pursuit (CoSaMP) in order to take advantage of the sparse nature of the pilot subcarriers used in OFDM, optimizing the bandwidth of system. In addition, to improve the performance of these algorithms, the sparse parity checking matrix concept is used, which is implemented in the deployment of low density parity check codes (LDPC) to obtain a sensing matrix that improves the isometric restriction property (RIP) belonging to the CS paradigm. The document shows the model implemented in the SDR equipment and analyze the bit error rate and the number of pilot symbols used.

Keywords: Channel Estimation, LDPC, OFDM, SDR, Compressive Sensing.

^{1,*}Carrera de Ingeniería Electrónica / GITEL, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

<http://orcid.org/0000-0002-1710-3052>, <http://orcid.org/0000-0002-4734-7218>

²Carrera de Telecomunicaciones / GITEL, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: jinga@ups.edu.ec <http://orcid.org/0000-0003-2580-9677>

Recibido: 31-10-2019, aprobado tras revisión: 09-12-2019

Forma sugerida de citación: Yanza-Verdugo, A.; Pucha-Cabrera, C. e Inga-Ortega, J. (2020). «Estimador de canal basado en sensado compresivo y LDPC para OFDM usando SDR». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 74-85. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.07>.

1. Introducción

La técnica de transmisión más implementada en la actualidad en redes inalámbricas es multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) debido a sus ventajas en la transmisión de datos de alta velocidad a través de canales selectivos en frecuencia. Así, el uso de OFDM ha tenido alto rendimiento debido a su alta eficiencia en el uso del espectro radio eléctrico y su robustez al retardo por multitrayectos [1, 2]. Además, a través del uso de un prefijo cíclico se reduce la interferencia entre símbolos (ISI, del inglés *Intersymbol Interference*) y la interferencia entre portadoras (ICI, del inglés *Inter Carrier Interference*) permitiendo reemplazar el uso de complejos ecualizadores en el dominio del tiempo por un simple ecualizador en el dominio de la frecuencia [3]. En este sentido, para canales de radio selectivos en frecuencia y que varían en el tiempo en sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha, es necesario aplicar estimación de canal confiable para implementar detección coherente [1].

Hay tres tipos de estimadores de canal: estimación ciega, estimación semiciega y modulación asistida por pilotos (PSAM, del inglés *Pilot Symbol Assisted Modulation*). PSAM usa símbolos piloto que son conocidos tanto por el receptor como por el transmisor en diferentes posiciones para obtener una aproximación del canal a cambio de perder eficiencia espectral. Por su parte, la estimación ciega está enfocada en procesos estadísticos con alto nivel matemático presentando mejoras con respecto a la eficiencia espectral, aunque no es muy utilizado en la actualidad debido a su alta complejidad, velocidad lenta para converger y bajo rendimiento [4]. La estimación semiciega usa una combinación de los dos anteriores para llegar a un convenio entre complejidad y eficiencia; para ello se utilizan tanto secuencias de entrenamiento como modelos estadísticos de canal [5].

De acuerdo con lo antes mencionado, este trabajo propone el uso de PSAM para la estimación de canal, donde la ganancia del canal y la distorsión de fase se obtienen a partir de la señal recibida en las posiciones de los símbolos piloto [1]. Estos símbolos piloto también son usados para mejorar la sincronización de tiempo y frecuencia en el sistema de comunicación. Sin embargo, para incrementar el rendimiento, es necesario el uso de un mayor porcentaje de símbolos piloto e implica que ciertas subportadoras no transmitan información [2].

Además, este trabajo con el objeto de mejorar la utilización del ancho de banda reduce el número de subportadoras piloto a través del uso de la teoría de sentido compresivo (CS, del inglés *Compressive Sensing*) en la estimación de canal. Esto se puede aplicar ya que es posible estimar el canal aprovechando la teoría de CS, al considerar que el número de símbolos piloto

es disperso en relación con el número total de símbolos que conforman un mensaje OFDM obteniendo una versión comprimida del canal correspondiente a los efectos del mismo sobre las subportadoras piloto [6].

También, se optimiza el proceso en la implementación sobre equipos de radio definido por *software* (SDR, del inglés *Software Defined Radio*) a través del uso de la matriz de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC, del inglés *Low Density Parity Check*) combinado con el paradigma de CS.

A partir de aquí, el artículo se ordena de la siguiente forma: en la sección 2 se discute el modelado matemático de OFDM, CS y la aplicación de matrices LDPC con CS. En la sección 3 se describe la implementación en los dispositivos SDR usando las matrices LDPC con CS. La sección 4 presenta los resultados obtenidos, el análisis del ancho de banda y el análisis de la tasa de error de bit (BER, del inglés *Bit Error Rate*). Finalmente, en la sección 5 se dan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. Modelado matemático

La implementación se desarrolla a partir del modelo matemático de OFDM, donde un símbolo OFDM es representado por $S(q) \in \mathbb{R}^Q$, así un conjunto Q de símbolos de información es transmitido por el símbolo j de OFDM, cada uno con una subportadora q es $S_j(q)$, por tanto $[S_j(0), \dots, S_j(q), \dots, S_j(Q-1)]^T$ representa el vector de símbolos de información transmitidos en el j -ésimo símbolo OFDM [2, 7].

Cada símbolo OFDM usa el flujo serial de símbolos de información convirtiéndolos en Q flujos paralelos para luego insertar los símbolos piloto necesarios en la estimación del canal según el esquema de transmisión propuesto. Además, se adicionan subportadoras en cero para establecer bandas de guarda entre cada símbolo OFDM y así evitar la interferencia de canales adyacentes. La cantidad de subportadoras de un símbolo OFDM se evidencia en (1).

$$Q = I + P + Z \quad (1)$$

Donde I corresponde al número de subportadoras con información, P es el número de subportadoras piloto y Z es el número de subportadoras en cero para un símbolo OFDM. De acuerdo con esto, la Ecuación (2) describe el formato de un símbolo OFDM correspondiente al dominio de la frecuencia, luego se aplica la transformada inversa de Fourier (IDFT, del inglés, *Inverse Discrete Fourier Transform*) para obtener el símbolo en el dominio del tiempo tal como se describe en la Ecuación (3). La distribución del relleno de ceros se detalla en [8].

$$S_z(q) \triangleq \begin{cases} S(q), & \frac{Q-(I+P)}{2} \leq q \leq \frac{Q-(I+P)}{2} - 1 \\ 0, & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_z = F^H S_z \quad (3)$$

La reducción de ISI e ICI se da por el uso del llamado prefijo cíclico (CP) que consiste en una extensión cíclica del símbolo OFDM. El CP es tan largo como el retardo de propagación esperado y los efectos de ambos se encuentran en [9]. Por otra parte, la señal recibida para OFDM puede ser descrito como en la Ecuación (4).

$$y_j = H_j s_j + z_j \quad (4)$$

El vector de símbolos de información recibidos es $y_j = [y_j(0), \dots, y_j(Q-1)]^T$ en el j -ésimo símbolo OFDM, z_j es el ruido gaussiano y H_j denota el valor del canal para el j -ésimo símbolo OFDM, que es obtenido mediante el bloque de estimación de canal [7].

El receptor usa el algoritmo de Van de Beek que aprovecha el prefijo cíclico para establecer el inicio y el fin de un símbolo OFDM. Este algoritmo también permitirá corregir los efectos del canal en posibles desplazamientos de fase y evitar una pérdida de ortogonalidad en las subportadoras [10].

A continuación, se retira el prefijo cíclico y se aplica la transformada discreta de Fourier (DFT, del inglés, *Discrete Fourier Transform*) para recuperar los símbolos de información. Previo a la recuperación de los símbolos de información se estima el canal luego de remover el relleno de ceros y extraer los símbolos piloto. Los datos ecualizados se obtienen a través de la operación indicada en la Ecuación (5) [11]. En donde $\hat{H}_e(q)$ es el canal estimado. La Tabla 1 presenta una lista de todas las variables usadas a lo largo de este trabajo.

$$S_e = \frac{Y(q)}{\hat{H}_e(q)} \quad q = 0, 1, \dots, Q-1 \quad (5)$$

2.1. Sensado compresivo

Desde otra perspectiva, el paradigma de CS considera una señal «dispersa» x que posee solo K elementos diferentes de cero con $K \ll N$ y donde $x \in \mathbb{R}^N$. Entonces, a través de una matriz Φ de $M \times N$ con $N > M$, llamada matriz de sensado, se busca concentrar la información más relevante de x a través del uso de otro vector $y \in \mathbb{R}^M$. Si esto no se cumple, se reduce la capacidad de reconstruir x a partir de y ; a esta restricción se la conoce como condición de espacio nulo (NSP, del inglés *Null Space Property*) [11, 12].

No es fácil encontrar señales consideradas «dispersas», no obstante, es posible encontrar una aproximación a este concepto que se da cuando la señal x puede ser «comprimible» en alguna base vectorial diferente a la original [11–13]. Por tanto, $x = \Psi\alpha$, donde Ψ (también llamada matriz diccionario de x) corresponde a la base vectorial en la que se proyecta x , y α corresponde

a los átomos de x dentro del dominio de Ψ . Así se tiene que la señal original x puede ser representada a través de la combinación lineal que propone en (6) [14]. El diccionario por ejemplo puede ser de Fourier, DCT o de Wavelet [11, 15, 16].

$$x = \Psi\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i \psi_i \quad (6)$$

La compresión de la señal x en la señal y se puede obtener a través de (7) donde $\Theta = \Phi\Psi$. La Figura 1(a) y la Figura 1(b) exponen de forma gráfica el concepto de CS [13, 17].

$$y = \Phi x = \Phi\Psi\alpha = \Theta\alpha \quad (7)$$

La literatura recomienda que Φ sea aleatoria para cumplir la propiedad de restricción isométrica (RIP, del inglés *Isometric Restriction Property*) y así x pueda ser reconstruida a partir de y [16, 18]. Las matrices de sensado en general se pueden obtener de un proceso aleatorio con distribución normal, consiguiendo un buen rendimiento durante la reconstrucción de la señal, pese a que, estas distribuciones pueden llegar a demandar muchos recursos [15, 16].

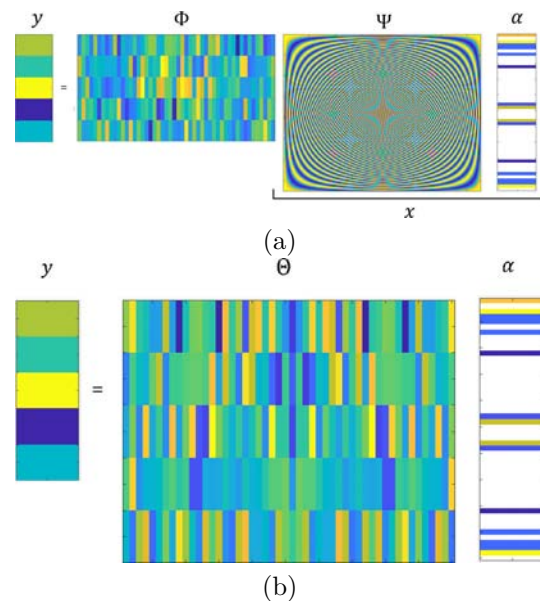


Figura 1. Principio de operación de sensado compresivo: (a) proceso de medición en CS con una matriz de sensado aleatorio Φ y matriz de medición Ψ . (b) proceso de medición con $\Theta = \Phi\Psi$.

Debido a que $N > M$ y que $N \gg K$, el proceso de reconstrucción de x se convierte en un problema de optimización expuesto en la Ecuación (8) donde se busca obtener los átomos α que minimicen el error de $\|y - \Theta\alpha\|_0$.

Tabla 1. Lista de variables

Variabes	Descripción
Q	Total de subportadoras en el símbolo OFDM.
$S_j(q)$	Subportadora q en el j -ésimo símbolo OFDM.
I	Total de subportadoras con información.
P	Total de subportadoras piloto.
Z	Total de subportadoras en cero.
$S_z(q)$	Símbolo OFDM con zero-padding en la subportadora q .
F	Matriz de transformada de Fourier.
s_z	Símbolo OFDM con relleno de ceros en el tiempo.
y_j	Vector de símbolos recibidos en el j -ésimo símbolo OFDM en el tiempo.
H_j	Vector de canal en el j -ésimo símbolo OFDM.
s_j	j -ésimo símbolo OFDM transmitido en el tiempo.
Z_j	Ruido gaussiano complejo.
$Y(q)$	Símbolo OFDM en frecuencia, removido el prefijo cíclico, el relleno de ceros y sin pilotos.
S_e	Símbolos ecualizados en la frecuencia.
$H_e(q)$	Canal estimado en la frecuencia.
x	Vector de datos de longitud N .
y	Vector comprimido de longitud M .
Φ	Matriz de compresión o sensado, Phi.
N	Longitud total del vector de datos a comprimir.
K	Total de elementos diferentes de cero.
M	Longitud total del vector de datos comprimido.
Ψ	Matriz de medición o diccionario, Psi.
α	Vector de coeficientes dispersos, alpha.
Θ	Matriz de sensado en su forma completa, Theta.
W_c	Cantidad de "1"s lógicos por columna en H_{LDPC} .
W_r	Cantidad de "1"s lógicos por fila en H_{LDPC} .
H_{LDPC}	Matriz de paridad de LDPC.
A	Matriz de $D \times E$ elementos.
B	Matriz de $D \times D$ elementos.
D	Cantidad de bits de paridad en la codificación.
E	Cantidad de bits de información en la codificación.
G	Total de bits de información + paridad (<i>codeword</i>).
H_i	Matriz de paridad de LDPC irregular lado izquierdo.
SC	Matriz de paridad de LDPC escalera lado derecho.
Tr	Matriz de paridad de LDPC triangulo lado derecho.
\hat{H}_p	Canal de pilotos.
Y_p	Símbolos pilotos recibidos.
S_p	Símbolos pilotos conocidos.
N_f	Separación frecuencial entre pilotos.
Φ_{LDPC}	Matriz de sensado construido con base LDPC.

$$\alpha = \arg \min \|\alpha\|_0 \quad s.t. \Phi \Psi \alpha \quad (8)$$

A partir de α se puede reconstruir x usando la Ecuación (6). Sin embargo, el problema de optimización no tiene solución ya que es del tipo NP Hard [11–13]. En este aspecto, los algoritmos de reconstrucción dispersa buscan relajar el problema de optimización para obtener una solución pseudoóptima. Además, pueden mejorar su rendimiento si se usa una matriz de sensado adecuada que permita la preservación de la información y garantice la reconstrucción de la señal original de manera única [15, 16, 19–22].

Entre los algoritmos de reconstrucción dispersa más populares usados en la aplicación de CS para la estimación de canal, destaca *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) perteneciente al tipo de algoritmos basados en búsqueda codiciosa. Así, OMP se basa en aproximaciones sucesivas de los

coeficientes α , identificando de manera iterativa el soporte de la señal hasta alcanzar un criterio de convergencia [19, 23]. El algoritmo que lo describe se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Algoritmo OMP

Algoritmo 1: Algoritmo OMP (Orthogonal Matching Pursuit)

Paso 1 **Entrada:** $Y = \{y_1, \dots, y_M\}$; Entrada Comprimida $\Theta_{N,N}$; Matriz de sensado completa k ; Número de repeticiones

Paso 2 **Salida:** α_N

Paso 3 **Inicialización:** $res_M = Y$;

$indx = \phi$;

Paso 4 **for** $iter = 1$ **to** k :

$\lambda = \arg \max |\Theta^T \times res_M|$;

$indx = indx \cup \lambda_M$;

$\alpha_N = \phi$;

$\alpha_N(indx) = pinv(\Theta(:, indx)) \times Y$;

$res = Y - \Theta \times \alpha_N$;

endfor

Paso 5 **Retornar:** α_N

Otro algoritmo de reconstrucción dispersa empleado en este caso de aplicación de CS es *Compressive Sampling Matching Pursuit* (CoSaMP) descrito en [24]. El algoritmo aproxima la señal objetivo de forma iterativa y en cada iteración la aproximación actual obtiene un residual actualizando las muestras para que reflejen el residuo actual. Estas muestras se utilizan para identificar los componentes grandes para estimar la aproximación utilizando mínimos cuadrados. Este proceso se repite hasta que se haya encontrado la energía recuperable en la señal. El algoritmo que lo describe se indica en la Tabla 3 [25].

Tabla 3. Algoritmo CoSaMP

Algoritmo 2: Algoritmo CoSaMP (Compressive Sampling Matching Pursuit)

Paso 1 **Entrada:** $x \in R^N$; Entrada Comprimida

$\Theta \in R^{m \times N}$; con $N > m$; Matriz de sensado completa k ; Número de repeticiones

Paso 2 **Salida:** S_{est}

Paso 3 **Inicialización:** $u = \Theta x$, Vector de medición;

$\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ Índice de columnas de Θ ;

Paso 4 **for** $iter = 1$ **to** k :

$\Omega_k \subset \Omega \rightarrow \Theta_{\Omega_k}$;

$\Omega_{k+1} = J_s^*$ donde $J_s^* \subset \Omega$;

$J = \text{Supp}\{T_1(|\Theta \times r_k|; \tau_{k,1})\}$ con $|J| \leq 2s$;

donde: T_1 es una función de umbral acorde a: $\tau_{k,1} \geq 0$;

τ_k : residual;

con $\Omega_k \cup J : \|u - \Theta_{\Omega_k \cup J} b\|_2$ minimizado;

donde: $I_{\Omega_k \cup J}$ es una matriz diagonal $N \times N$;

$i \in \Omega_k \cup J$;

$J_s^* = \text{Supp}\{T_2(|b|; \tau_{k,2})\}$;

donde: T_2 es una función de umbral;

$\tau_{k,2} \geq 0$ máximo de s elementos de b que son retenidos;

$S_{est} = b(J_s^*)$;

$r_{k+1} = u - \Theta_{\Omega_{k+1}} b$;

endfor

Paso 5 **Retornar:** S_{est}

Estos algoritmos son aptos para ser usados en aplicaciones o reconstrucciones donde su funcionamiento se dé en tiempo real debido a su bajo coste computacional.

Debido a que la matriz de sensado debe satisfacer la propiedad RIP, se considera el uso de las matrices de comprobación de paridad usadas en el diseño de codificadores de canal en los códigos LDPC ya que cumplen el criterio de RIP y son deterministas, por ello, consumen menos recursos mostrándose como una buena opción para la matriz de medición en CS [20–22]. Esto permitirá no usar un patrón de pilotos del tipo peine o bloque como es comúnmente utilizado en sistemas OFDM con PSAM. Conforme a esto, se busca usar un patrón de pilotos pseudoaleatorio disperso empleando una matriz de comprobación de paridad LDPC [5].

2.2. Matriz de comprobación de paridad LDPC

La matriz de comprobación de paridad H_{LDPC} define las relaciones entre los distintos símbolos de codificación (símbolos fuente y símbolos de paridad). Existen dos tipos, las matrices regulares que tienen un número fijo Wc de «1»s lógicos por columnas y un número fijo Wr de «1»s lógicos por filas. El segundo es el caso de las matrices irregulares cuyos valores de «1»s lógicos por filas es Wr y por columnas Wc con $Wr \neq Wc$. La matriz está formada por elementos con valores «0» y «1», y es dispersa ya que la mayoría de elementos son nulos [26]. Se describe esta matriz en la Ecuación (9).

$$H_{LDPC} = [A|B] \quad (9)$$

La matriz A tiene dimensiones $D \times E$ y la matriz B es de $D \times D$. Donde E corresponde a la cantidad de bits de información, D es la cantidad de bits de paridad en la codificación LDPC y $G = E + D$ correspondería a la longitud del codeword. Las matrices LDPC regulares se dividen en Gallager caracterizada por una estructura de bandas horizontales [27]. También, en Mackay-Neal caracterizada por una construcción aleatoria [28]. Este tipo de matrices no garantiza una independencia entre columnas necesaria por RIP en CS, por lo cual no se usarán en esta implementación [13].

Las matrices irregulares se dividen en escalera y triángulo (*staircase* y *triangle*) [29]. Son matrices que contienen dos submatrices y cada una de estas un método diferente de creación [29, 30]. La submatriz izquierda H_i de tamaño $D \times E$ se construye de la siguiente manera:

- Usar un vector en el que conste una lista aleatoria de posibles posiciones de «1»s en las filas. Este vector se utiliza para garantizar una distribución homogénea.

- Se coloca en cada columna Wc elementos no cero, escogiendo las posiciones del vector de posibles localizaciones. Si ya no se cumple la condición de máximo Wr elementos no cero por fila se escoge otra posición aleatoria disponible.
- Se añade elementos no cero en las filas que tengan menos de dos elementos para evitar problemas en la decodificación.

La submatriz derecha hace la diferencia en la formación de una matriz LDPC irregular ya que se puede formar en escalera o de forma triangular y en cualquier caso es una matriz de dimensión $D \times D$. En el caso de la matriz Sc , es una matriz identidad a la que posteriormente se coloca los elementos no cero en la parte inferior diagonal. La Ecuación (10) muestra una matriz H_{LDPC} construida mediante este método.

$$(H_i|SC) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & \vdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \vdots & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La submatriz derecha triángulo Tr se compone de una matriz identidad como base de dimensión $D \times D$, posteriormente se coloca una matriz triangular inferior dispersa. La Ecuación (11) muestra una matriz H_{LDPC} construida mediante este método.

$$(H_i|Tr) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & \vdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \vdots & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & \vdots & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \vdots & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. Implementación de CS y LDPC para la estimación de canal

Este trabajo se implementa en equipos periféricos universales de radio por *software* (USRP, del inglés *Universal Software Radio Peripheral*). El diagrama de bloques del sistema implementando se puede apreciar en la Figura 2, donde se presenta cada etapa del sistema de comunicación.

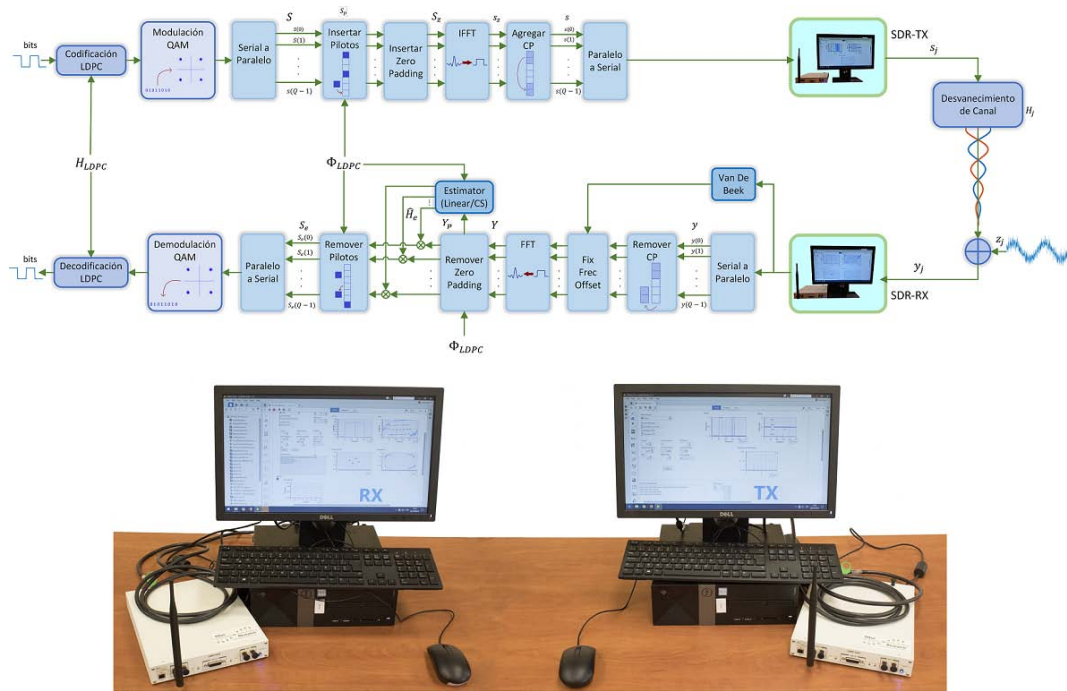


Figura 2. Modelo del sistema OFDM implementado.

Las características de los equipos usados, son los USRP Ettus X310 equivalentes al NI-USRP 2940R con las siguientes especificaciones:

- Ancho de banda de hasta 40 MHz por cada canal (2 canales).
- La imagen cargada en el FPGA permite conexión Ethernet de 1 Gbps para transmitir 25 MS/s Full Duplex.
- La arquitectura UHD usada es la disponible para «LABVIEW Communication Design Suite».
- Arquitectura de reloj flexible con frecuencia de muestreo configurable.

El ancho de banda del sistema está en función del índice IQ usado. El índice IQ determina el ancho de banda disponible [31].

Se debe indicar que con el objeto de trabajar con un sistema de comunicaciones más apegado a la realidad, se ha usado un codificador de canal LDPC considerando lo trabajado en [32, 33]. La selección de las matrices H_{LDPC} de esta implementación se estableció por validación a través del análisis de BER. La selección de la matriz H_{LDPC} aplicó simulaciones variando la dispersidad de «1»s de la matriz considerando un canal AWGN con desvanecimiento de Rayleigh. Estas matrices tienen un tamaño de $G=40$ y $E=20$, debido a su eficiencia y velocidad de acuerdo con la Figura 3. Por esto, la implementación del codificador de canal usa las matrices de verificación de paridad de tipo escalera.

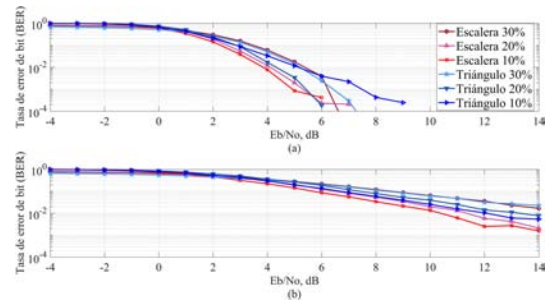


Figura 3. Análisis BER para matrices LDPC irregulares con diferentes porcentajes de dispersión de «1»s: (a) en un canal AWGN. (b) en un canal con desvanecimiento de Rayleigh.

3.1. Estimación de canal basado en CS

En la estimación lineal, el proceso mejora cuando la cantidad de pilotos aumenta a expensas de una reducción del ancho de banda disponible para transmitir información. No obstante, el uso de CS para estimar el canal reduce el número de subportadoras piloto en el proceso es posible ya que solo hay K subportadoras usadas como pilotos. Así, en la Ecuación (12), \hat{H}_p es la versión comprimida del canal. Entonces, el vector comprimido y corresponde a \hat{H}_p dividiendo los pilotos recibidos Y_p para los enviados S_p . Por tanto, la matriz de sensado Φ es una matriz de tamaño $P \times N$ en donde cada N_f elemento es distinto de 1 y corresponde a la posición de cada símbolo piloto, como se observa en la Ecuación (13) [6]. En una distribución tipo peine N_f es constante.

$$\hat{H}_p = \frac{Y_p}{S_p} \quad (12)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \underbrace{N_f} & & & & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{P,N} \quad (13)$$

Para aplicar CS, se consideró un diccionario Ψ a partir de la DFT para aprovechar el proceso inherente a la IDFT y DFT que se da en OFMD. Los algoritmos de reconstrucción dispersa usados son OMP y CoSaMP, usan como parámetros de entrada los datos comprimidos \hat{H}_p , la matriz $\Theta = \Phi\Psi^H$ y el total de iteraciones. El número máximo de iteraciones debe estar en relación con el número K de elementos no cero de la señal a construir, en este caso, el número de portadoras piloto [13]. De esta manera, el canal estimado \hat{H}_e , se obtiene de la forma indicada en la Ecuación (14).

$$\hat{H}_e = 0_N$$

$$\hat{H}_e = \hat{H}_e + \Psi_{N,i}^H \times \alpha_i \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

3.2. Estimación de canal con CS y LDPC

Como se indicó en la sección 2, la matriz de sensado Φ debe cumplir el criterio de RIP para que pueda recuperar adecuadamente la señal dispersa, no obstante, la matriz usada en la Ecuación (13) cumple este criterio en los límites de la restricción ya que no es aleatoria. Por lo tanto, se desarrolla una matriz de posición de pilotos Φ_{LDPC} que mejore este requisito. De forma similar a la Ecuación (13), cada elemento no cero corresponde a una posición de cada subportadora piloto en la Ecuación (15) [6].

$$\Phi_{LDPC} = \begin{bmatrix} \underbrace{N_f} & & & & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{P,N} \quad (15)$$

La Ecuación (15) mantiene la distancia entre las subportadoras piloto N_f como variable y pseudoaleatoria debido al uso de los algoritmos de LDPC con el que se construye la matriz H_{LDPC} . Para el diseño de H_{LDPC} la cantidad de «1»s por fila es igual a 1

tomando en cuenta la cantidad de subportadoras piloto. Además, el porcentaje total de elementos no cero debe ser igual al número de pilotos P .

A partir de la obtención de esta matriz Φ_{LDPC} el proceso continúa con la estimación del canal utilizando los algoritmos de reconstrucción dispersa OMP y CoSaMP considerando la distribución de los pilotos obtenidos en Φ_{LDPC} .

3.3. Escenarios implementados

Este trabajo aplicó diferentes escenarios manteniendo un enfoque para sistemas Long Term Evolution (LTE). Para esto, se tomó en cuenta las características de LTE tales como el número de subportadoras, símbolos de referencia, subportadoras nulas y la longitud del CP indicadas en [31,34]. Se usó una separación de 7.5 KHz entre subportadoras debido a que con el uso prolongado el rendimiento decae al usar 15 KHz. Entonces el ancho de banda implementado fue de 1.92 MHz. Es necesario aclarar que no se usó un número mayor de subportadoras como si lo permite LTE debido a que el procesamiento del código fuente se dio desde el computador y no sobre el FPGA del equipo.

El primer escenario implementado no usa el codificador de canal y tiene las siguientes características:

- IQ sample rate: 1.92 MS/s
- Frecuencia de portadora: 1.99 GHz
- Modulación: 4 QAM
- Iteraciones del algoritmo OMP: 5
- Longitud del mensaje transmitido (tren de bits): 1600
- Número de muestras en el receptor: $3 \times$ total de datos transmitidos
- Total de subportadoras OFDM: 256
- Total de subportadoras con datos + pilotos: 150
- Ganancia del transmisor: 15.5 - 21 dB
- Sensibilidad del receptor: 0 dB

Para obtener los resultados del comportamiento de los estimadores de canal para los diferentes algoritmos de reconstrucción dispersa, OMP y CoSaMP, así como del estimador lineal, se usaron dos SDR por separado ubicados a una distancia considerable en un ambiente cerrado (indoor) en el laboratorio de pruebas como se observa en la Figura 2. La distancia se consideró como constante y se modificaron las potencias de los equipos para obtener las variaciones de la relación señal a ruido (SNR, del inglés *Signal to Noise Ratio*) y someter los diferentes estimadores de canal al análisis de BER.

Para el segundo escenario las condiciones anteriores se repiten agregando el codificador de canal LDPC usando las siguientes configuraciones:

- Iteraciones del algoritmo de propagación para la decodificación LDPC: 100
- Matriz H_{LDPC} con $G=40$ y $E=20$
- Tipo de matriz LDPC en el codificador: escalera con dispersidad de «1»s entre el 5 al 10 %.

El escenario final de análisis se implementa con distancia variable entre transmisor y receptor, también en un ambiente cerrado para evaluar un canal en condiciones más rigurosas. La distancia de separación entre los SDR consideró la longitud, distribución física del laboratorio con distancias entre 4 y 10 metros considerando una potencia constante que no sature el canal.

La variación de distancia permitió recrear canales con gran desvanecimiento, generando un aumento del efecto de multitrayectorias para evaluar el comportamiento de los estimadores. La frecuencia de transmisión es de 2.4 GHz, por lo que coexiste con la red de wifi del laboratorio, haciendo que el canal varíe constantemente.

En este escenario se trabajó en la presencia de estudiantes utilizando un codificador LDPC manteniendo la siguiente configuración:

- IQ sample rate: 1.92 MS/s
- Frecuencia de portadora: 2.4 GHz
- Modulación: 4 QAM
- Iteraciones del algoritmo OMP: 5
- Iteraciones del algoritmo de propagación para la decodificación LDPC: 100
- Matriz H_{LDPC} con $G=40$ y $E=20$
- Longitud del mensaje transmitido (tren de bits): 1240
- Número de muestras en el receptor: $2 \times$ total de datos transmitidos
- Número Total de subportadoras OFDM: 256
- Número Total de subportadoras con datos + subportadoras piloto: 150
- Tipo de matrices LDPC en el codificador: escalera con dispersidad de 1 s entre el 5 al 10 %, 10 al 20 % y 20 al 30 %
- Ganancia del transmisor: 20 dB
- Sensibilidad del receptor: 20 dB

4. Análisis de resultados

4.1. Escenarios 1 y 2 - Análisis de BER

En la implementación del algoritmo OMP, el número de interacciones debe ser elegido de forma que K corresponda al número de elementos diferentes de cero de la señal que se busca recuperar. Para definir este valor, se desarrollaron múltiples pruebas buscando minimizar el error en la estimación de canal obteniendo que el valor adecuado para que este algoritmo converja en la implementación es de $K = 5$ correspondiente al número mínimo de subportadoras usado.

La Figura 4 muestra el comportamiento de BER con 5 y 25 subportadoras piloto para los estimadores basados en OMP, CoSaMP y el estimador lineal para el primer escenario.

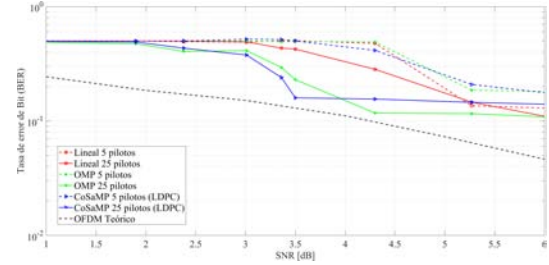


Figura 4. Análisis de BER sin codificador de canal.

En la Figura 4 se puede observar que a bajos niveles de SNR el estimador lineal presenta un rendimiento menor con respecto al uso de los estimadores basados en el paradigma de CS empleados. Con 25 subportadoras piloto, los estimadores de canal alcanzan una reducción considerable en la probabilidad de pérdida de bits. En estas pruebas los algoritmos de CoSaMP y OMP trabajaron con la matriz Φ_{LDPC} y en ausencia de esta (distribución de subportadoras piloto de tipo peine).

La Figura 5 muestra el comportamiento de BER para 5 estimadores de canal usando las configuraciones del segundo escenario. Entonces, la Figura 5(a) de acuerdo con lo esperado por el uso de un codificador de canal, puede observarse una clara mejora respecto del caso anterior. El estimador lineal tiene los peores resultados ante un SNR bajo. Por otra parte, los estimadores CoSaMP tienen un rendimiento similar usando o no la matriz Φ_{LDPC} . No obstante, la versión con matriz Φ_{LDPC} presenta un mejor rendimiento. También, a medida que mejora el SNR, el estimador CoSaMP sin matriz Φ_{LDPC} tiene una ligera mejora, pero continuando ambos con la misma tendencia en su comportamiento. Los estimadores OMP por su parte, presentan un menor rendimiento contrastados con CoSaMP, teniendo en cuenta que la versión con la matriz Φ_{LDPC} es la que peores resultados ofrece en particular para este algoritmo.

La Figura 5(b) muestra resultados del rendimiento de los estimadores frente al BER usando 25 subportadoras piloto para cada uno. Se puede observar que el estimador lineal presenta mayor probabilidad de error de bit para un bajo SNR, mostrando el peor comportamiento de entre todos los estimadores analizados. Sin embargo, cuando el SNR supera a *a priori* el valor de 3.5 dB su rendimiento aumenta, obteniendo la menor probabilidad de error de bit frente a los otros estimadores.

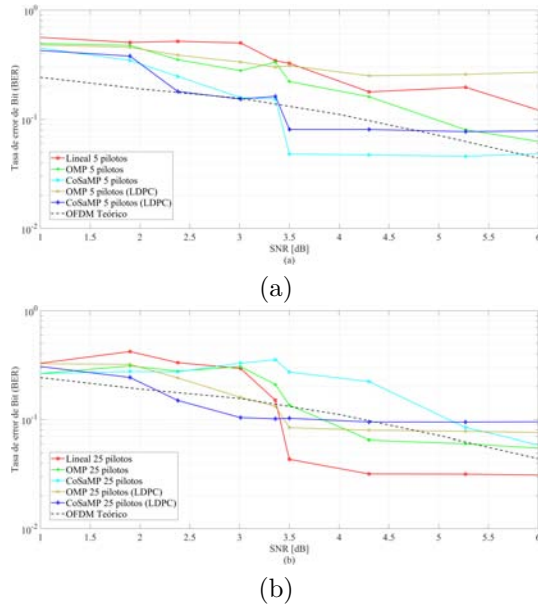


Figura 5. Análisis de BER con codificador de canal LDPC: (a) BER con 5 pilotos (b) BER con 25 pilotos.

4.2. Escenario 3 – Análisis para distancias variables

Las Figuras 6 y 7 corresponden al comportamiento del estimador lineal y de los estimadores basados en CS con y sin la matriz Φ_{LDPC} .

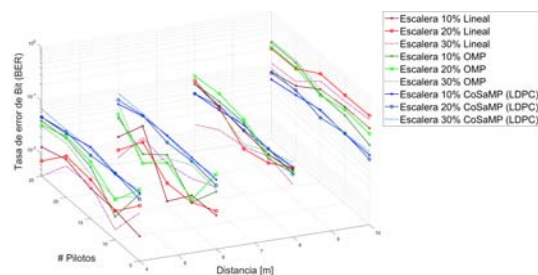


Figura 6. Análisis de BER para diferentes distancias.

La Figura 6 muestra que el estimador lineal tiene un mejor comportamiento a muy corta distancia, lo que corresponde a los resultados anteriores en el análisis de BER. No obstante, a medida que la distancia aumenta, este estimador de canal reduce su rendimiento

en forma drástica. El estimador CoSaMP con Φ_{LDPC} es mejor en contraste con lo que sucede con el estimador que usa OMP. Se debe indicar que esta figura toma en cuenta los resultados ante el uso de 5 a 25 subportadoras piloto.

Debido a que el decodificador de canal usa como entrada las respuestas de los estimadores de canal, en este escenario se analizó el porcentaje de valores que de dicho codificador no pudo resolver. De esta manera, la Figura 7 muestra el porcentaje de valores nulos (NaN) en contraste con los cambios de distancia para cada estimador de canal.

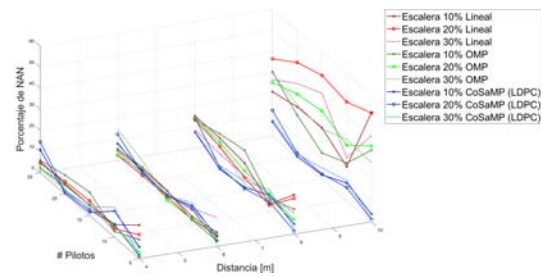


Figura 7. Análisis de la convergencia del decodificador de canal según la respuesta de los estimadores a diversas distancias.

La Figura 7 también corrobora los resultados anteriores resaltando la misma tendencia en los estimadores. El estimador lineal trabaja mejor a distancias cortas y los estimadores CS tienen mejor rendimiento que el lineal frente a canales ruidosos, comprobándose esto al aumentar la distancia.

4.3. Análisis del ancho de banda

La Figura 8 muestra la relación que existe entre el ancho de banda usado por las subportadoras piloto y el ancho de banda para el envío de información en un símbolo OFDM. De este modo, usar 5 subportadoras piloto en lugar de 25, corresponde a una mejora de eficiencia espectral del 13.33 %. Esta mejora espectral corresponde al uso de los estimadores de canal basados en CS como se ve en la Figura 8.

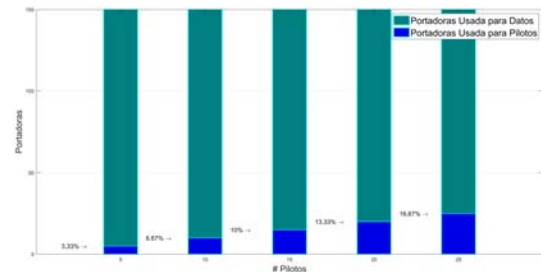


Figura 8. Ancho de banda ocupado a diferente número de pilotos.

5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, los estimadores CoSaMP presentan un mejor rendimiento para bajos niveles de SNR con el uso de la matriz Φ_{LDPC} . Los estimadores OMP muestran un comportamiento similar al CoSaMP aunque con menor rendimiento. Así, con los resultados obtenidos se deduce que, un estimador lineal trabaja el problema de la estimación de canal con muy baja complejidad computacional. No obstante, cuando el canal es muy ruidoso sobre todo debido a multitrayectos demanda mayor cantidad de subportadoras piloto para tratar de mantener su rendimiento, lo que significa reducción del ancho de banda efectivo. En contraste, los estimadores que basados en CS usados en este trabajo, además de mantener baja complejidad computacional, para canales ruidosos muestran un rendimiento adecuado, permitiendo la transferencia de datos en canales ruidosos, considerando que se evaluó en un ambiente indoor.

El uso del paradigma de CS mejora mientras las propiedades de RIP y de espacio nulo puedan asegurarse, en este caso, el canal se puede considerar como disperso porque el número de subportadoras piloto es disperso.

Además, implementar una matriz de sensado diseñada a partir de la conceptualización de las matrices LDPC ha permitido mejorar el comportamiento de los estimadores basados en CS, la mejora es más clara para el estimador que usa OMP. El estimador CoSaMP con Φ_{LDPC} muestra ser el mejor estimador frente a esta problemática de trabajo en conjunto con el codificador de canal usado. Entre los trabajos a futuro es implementar la estimación de canal y procesamiento previos en el FPGA del dispositivo para permitir que la comunicación entre el equipo y la fuente de datos pueda usar una mayor tasa de transmisión de datos.

Referencias

- [1] J. Sterba and D. Kocur, "Pilot symbol aided channel estimation for ofdm system in frequency selective rayleigh fading channel," in *2009 19th International Conference Radioelektronika*, April 2009, pp. 77–80. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2009.5158729>
- [2] C. Tzi-Dar and T. Pei-Yun, *OFDM Baseband Receiver Design OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications*, J. W. S. A. P. Ltd, Ed., 2007. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1002/9780470822500>
- [3] M. R. Raghavendra, S. Bhashyam, and K. Giridhar, "Exploiting hopping pilots for parametric channel estimation in ofdm systems," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, no. 11, pp. 737–740, Nov 2005.
- [4] N. N. Jimenez Castro Martínez, "Identificación ciega de canal disperso basado en algoritmos de sub-espacio," Master's thesis, 2016. [Online]. Available: <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/40>
- [5] M. Cordero Limón, "Técnicas de estimación de canal en la capa física wirelessman-ofdm de la norma ieee 802.16e," 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/2P9Q1co>
- [6] S. Zhang, J. Kang, Y. Song, and N. Wang, "An optimization for channel estimation based on compressed channel sensing," in *2012 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*, Aug 2012, pp. 597–602. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SNPD.2012.128>
- [7] Y. Liao, G. Sun, X. Shen, S. Zhang, X. Yang, X. Zhang, H. Yao, and N. Zhang, "Bem-based channel estimation and interpolation methods for doubly-selective ofdm channel," in *2018 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, Aug 2018, pp. 70–75. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SmartIoT.2018.00022>
- [8] Y. A. Al-Jawhar, K. N. Ramli, M. A. Taher, N. S. Mohd Shah, L. Audah, and M. S. Ahmed, "Zero-padding techniques in ofdm systems," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 704–725, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YAQGqc>
- [9] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 10, pp. 2908–2914, Oct 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/26.328961>
- [10] J. van de Beek, M. Sandell, and P. O. Börjesson, *ML estimation of timing and frequency offset in multicarrier systems*, div. of signal processing lulea university of technology s-971 87 lulea, sweden ed. Luleå tekniska universitet, 1996. [Online]. Available: <https://bit.ly/38qaO2W>
- [11] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, April 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
- [12] R. G. Baraniuk, "Compressive sensing [lecture notes]," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 4, pp. 118–121, July 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.4286571>

- [13] R. Baraniuk, M. A. Davenport, M. F. Duarte, and C. Hegde, *An introduction to compressive sensing*, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/38uCOCG>
- [14] Milliarde. (2016) Compressed sensing intro & tutorial w/ matlab. CODE PROJECT for those who code. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YC5Ewa>
- [15] J. Inga-Ortega, E. Inga-Ortega, C. Gómez, and R. Hincapié, "Electrical load curve reconstruction required for demand response using compressed sensing techniques," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Sep. 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2017.8126731>
- [16] M. Pinos and J. Inga, "Predicción de consumo eléctrico en la UPS de Cuenca usando P1P y censado comprimido," 2018.
- [17] E. J. Candes and M. B. Wakin, "An introduction to compressive sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21–30, March 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914731>
- [18] E. J. Candés, "The restricted isometry property and its implications for compressed sensing," *Comptes Rendus Mathématique*, vol. 346, no. 9, pp. 589–592, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crma.2008.03.014>
- [19] E.-G. Astaiza-Hoyos and H. F. Pablo Emilio Bermúdez-Orozco, "Compressive sensing: A methodological approach to an efficient signal processing," *Dyna*, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2qLx8TI>
- [20] H. Yuan, H. Song, X. Sun, K. Guo, and Z. Ju, "Compressive sensing measurement matrix construction based on improved size compatible array ldpc code," *IET Image Processing*, vol. 9, no. 11, pp. 993–1001, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2015.0117>
- [21] A. G. Dimakis, R. Smarandache, and P. O. Vontobel, "Ldpc codes for compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 5, pp. 3093–3114, May 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2181819>
- [22] S. Pawar and K. Ramchandran, "A hybrid dft-ldpc framework for fast, efficient and robust compressive sensing," in *2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Oct 2012, pp. 1943–1950. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/Allerton.2012.6483460>
- [23] H. Wang, W. Du, and Y. Bai, "Compressed sensing based channel estimation for OFDM transmission under 3 GPP channels," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 9, no. 4, pp. 85–94, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.14257/ijfgcn.2016.9.4.08>
- [24] D. Needell and J. A. Tropp, "Cosamp: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 26, no. 3, pp. 301–321, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.acha.2008.07.002>
- [25] B. L. Sturtn. (2011) Algorithm power hour: Compressive sampling matching pursuit (cosamp). [Online]. Available: <https://bit.ly/2RS0DOX>
- [26] I. D. F. Lava, "Implementación y evaluación de la codificación ldpc para la transmisión de ficheros en entornos unidireccionales," in *Computer Science*, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YCauJQ>
- [27] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, January 1962. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057683>
- [28] D. J. C. Mackay, *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge University Press, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E5yfQX>
- [29] G. G. Andrade Salinas, "Implementación de la codificación y decodificación del código LDPC (low density parity check) en MATLAB," 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/34ahKxG>
- [30] V. Roca, C. Neumann, and D. Furodet. (2008) Low density parity check (ldpc) staircase and triangle forward error correction (fec) schemes. [Online]. Available: <https://bit.ly/2RH8PBq>
- [31] E. Seidel, "Overview lte phy: Part 1 - principles and numerology etc," *NOMOR Research*, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/35cxH7R>
- [32] R. Prieto, A. Abril, and A. Ortega, "Experimental alamouti-stbc using ldpc codes for mimo channels over sdr systems," in *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, April 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2017.7946842>
- [33] B. Peñafiel and A. Ortega, "A joint multilevel modulator and robust ldpc codes processing over optical systems by providing solutions for holisc

- 5g backhaul,” in *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, Nov 2017, pp. 197–202. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MICC.2017.8311758>
- [34] J. Zyren, “Overview of the 3gpp long term evolution physical layer,” NXP Semiconductors, Tech. Rep., 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/35gg8E0>



ESTUDIO PARAMÉTRICO PARA OPTIMIZACIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO TUBULAR DE LABORATORIO

PARAMETRIC STUDY FOR OPTIMIZATION OF THE ICE TUBE GENERATOR OF LABORATORY

Rocío Guapulema-Maygualema^{1,*}, Víctor Hidalgo-Díaz^{2,3}

Resumen

En Ecuador existe un gran consumo energético por climatización y refrigeración en los sectores industrial, comercial y residencial. Un método para reducir la demanda eléctrica máxima es incorporar un sistema óptimo de almacenamiento de energía térmica de refrigeración. Este trabajo tiene por objetivo realizar el estudio paramétrico de un generador de hielo tubular de laboratorio para su posterior optimización. Se estudiaron los principales parámetros que intervienen en la formación de hielo como temperatura del agua en el reservorio, temperaturas del refrigerante en el evaporador y condensador, temperatura de subenfriamiento del hielo y velocidad de formación de hielo. Los parámetros destacados que intervinieron en el proceso fueron las condiciones ambientales del lugar y la temperatura del agua utilizada. Al disminuir la temperatura ambiental, disminuye la carga térmica y mejora la eficiencia del condensador, el cual influye directamente sobre la eficiencia del equipo. La inestabilidad observada en la primera hora de prueba intervino en la temperatura final del agua, la misma que varió en el rango de 1,1 °C a -0,4 °C en 3 horas.

Palabras clave: eficiencia energética, generador, hielo, optimización, refrigeración, almacenamiento.

Abstract

In Ecuador, there is a large energy consumption by air conditioning and refrigeration in the industrial, commercial and residential sectors. A maximum electricity demand reduction method is to incorporate an optimal cooling thermal energy storage system. The main objective of this work was to develop a parametric study of laboratory ice tube generator for an after optimization. For that, the main parameters were studied, which are: water storage temperature, refrigerant temperature in the evaporator and condenser, ice subcooling temperature and ice formation speed. Two outstanding parameters that intervened in the ice formation process were the place environmental conditions and the water temperature used, when the environmental temperature decreased, thermal load also decreased and condenser efficiency improved, which directly influenced the efficiency of the equipment. The instability observed in the first hour of test intervened in the final water temperature, final temperature ranged from 1.1 °C to -0.4 °C in three hours.

Keywords: Energy efficiency, ice, bank, optimization, refrigeration, storage.

^{1,*}Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena 150150, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: rocio.guapulema@ikiam.edu.ec, r.guapulema@hotmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2768-9018>

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170525, Ecuador.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4732-2421>

³Laboratorio Informática-Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito 170525, Ecuador.

Recibido: 24-10-2019, aprobado tras revisión: 09-12-2019

Forma sugerida de citación: Guapulema-Maygualema, R. y Hidalgo-Díaz, V. (2020). «Estudio paramétrico para optimización de un generador de hielo tubular de laboratorio». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 86-96. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.08>.

1. Introducción

En la actualidad, el ahorro de energía y la protección del medioambiente es un tema importante en todo el mundo [1]. Por otra parte, el almacenamiento de energía térmica es considerado una de las tecnologías energéticas más importantes [2] con fines de reducción de consumo eléctrico. Se han realizado estudios en generadores de hielo con la finalidad de evaluar y mejorar su funcionamiento a más de reducir el consumo eléctrico, parámetros evaluados como la conductividad térmica del material del condensador, la capacidad del tanque, el paso longitudinal y transversal de tubería del condensador y las temperaturas del refrigerante [3], afectan directamente al diseño del equipo, necesidad de espacio y eficiencia del sistema. De igual forma, se han evaluado pérdidas energéticas por almacenamiento de hielo, estructuras de costos y tarifas eléctricas, periodos de tarifas, capacidad de almacenamiento de los generadores de hielo y el impacto de la previsión de la carga [4].

En [5] se presenta un modelo para optimización de sistemas de aire acondicionado con termoacumulación y los resultados de la simulación del sistema. Considerando que, la creciente demanda de sistemas de aire acondicionado ha llevado a un mayor consumo de energía durante las horas pico [6], los sistemas de acumulación térmica son cada vez más populares [7], permitiendo el desarrollo de estudios que abarcan aspectos físicos, técnicos, económicos, ambientales [8,9] y de consumo de materia prima [10] de los sistemas de almacenamiento de energía térmica de refrigeración y sus aplicaciones [2], con el fin de encontrar un método que mejore su eficiencia [11].

En Ecuador, los sectores residencial, industrial y comercial, representan el 31 %, 25,9 % y 15,9 % de la demanda de energía [12]; aproximadamente el 50 % del consumo energético en los sectores residencial y comercial en las regiones Costa y Sierra, se debe a refrigeración y climatización [13]. El Balance Nacional de Energía Eléctrica presentado por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en junio de 2019 indica que, el consumo de electricidad para estos sectores fue de 17 736,87 GWh [12]. Un método para reducir la demanda eléctrica máxima es incorporar almacenamiento de energía térmica de refrigeración [14], el mérito radica en transferir el consumo de energía de las horas pico a las horas de bajo consumo [7, 10, 15]. La energía térmica se puede almacenar utilizando calor sensible o latente [16, 17], es decir, agua fría o hielo, siendo este último ventajoso ya que requiere volúmenes de almacenamiento más pequeños [18, 19].

Con el fin de ahorrar energía y optimizar procesos que utilizan sistemas de almacenamiento de energía frigorífica como climatización, procesamiento de lácteos, cervecerías, fabricación de plásticos, proce-

sos químicos, entre otros, es importante simular la eficiencia que tendría un equipo para generación y almacenamiento de hielo. Un estudio paramétrico fue realizado para optimización del generador de hielo tubular construido a través del proyecto de titulación Diseño y construcción de un generador de hielo tubular para laboratorio [20]. Este generador que corresponde al sistema de hielo sobre evaporador consiste en un arreglo de tubos sumergidos en un tanque por los cuales se bombea refrigerante frío para congelar el agua que los rodea [21]. Se estudiaron los parámetros que intervienen en el proceso de formación de hielo y almacenamiento de energía térmica de refrigeración mediante modelación matemática del ciclo térmico y de transferencia de calor. La creación de un programa para simulación numérica en el entorno *Guide* de Matlab permitió simular el funcionamiento del equipo en diferentes ambientes, mientras que, un estudio experimental se realizó para valorar la simulación numérica. Con este estudio se definieron los parámetros más importantes que modifican el funcionamiento y eficiencia del generador.

Los parámetros considerados para el estudio involucran temperaturas de almacenamiento de agua en el generador, temperaturas del refrigerante en el evaporador y condensador, temperatura de subenfriamiento de hielo, espesor de hielo y velocidad de liberación y extracción de calor de forma natural. Fue importante estudiar la generación de hielo, tomando en cuenta que, al aumentar el espesor aumenta la resistencia de transferencia de calor [22, 23].

2. Materiales y métodos

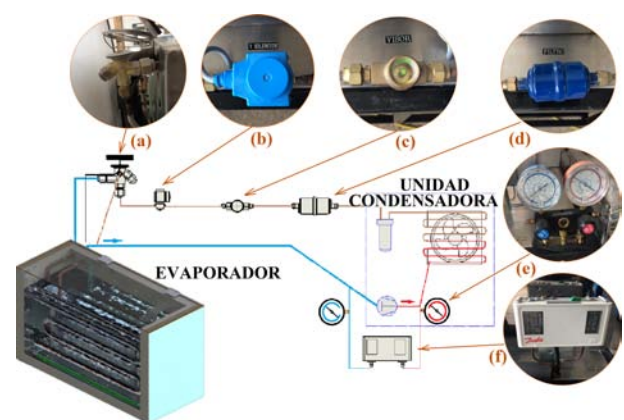


Figura 1. Generador de hielo tubular de laboratorio y elementos constitutivos: a) válvula de expansión, b) válvula solenoide c) visor de líquidos d) filtro secador, e) manómetros, f) presostato.

El equipo utilizado para el estudio paramétrico está conformado por una unidad condensadora L'UNIQUE HERMETIQUE CAJ2428ZBR de 1/2 HP de capacidad, que utiliza R404a como refrigerante, una válvula

de expansión TES 2 – 0,45, filtro A-TD -132 SAE, visor de líquidos SGI-10, válvula solenoide TR ¼ 032F8107, presostato, manómetros, tablero de control, conjunto tanque-reservorio, sistema de aire para agitación de agua y un evaporador alojado en el tanque (Figura 1), que está conformado por dos serpentines de cobre tipo L de 15,88 mm (1/2 pulg) de diámetro, cada uno de 3 metros de longitud. Entre cada serpentín existe una separación de 120 milímetros.

Además, entre los elementos que intervienen en el sistema de adquisición de datos se encuentra la interfaz de control, sensores LM 35, tarjetas Arduino UNO, computadora y *software* para adquisición de datos.

2.1. Modelación matemática en la generación de hielo

2.1.1. Análisis del ciclo térmico

En [24] indica el proceso para estudio y evaluación del ciclo de refrigeración y su eficiencia. Se tomó esta información como base para la modelación matemática del ciclo de refrigeración.

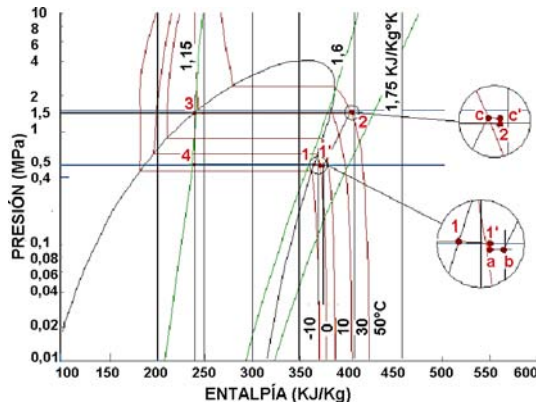


Figura 2. Diagrama Presión – Entalpía del generador de hielo tubular.

En el diagrama Presión-Entalpía (Figura 2) se observan cuatro procesos. El refrigerante que idealmente se encuentra como vapor saturado a temperatura $T_1 = -0,5^{\circ}\text{C}$ es comprimido y recalentado hasta alcanzar las condiciones de condensación a presión $P \approx 1,416 \text{ MPa}$, y temperatura $T \approx 28,9^{\circ}\text{C}$, para luego ser condensado sin que exista variación de temperatura. Posteriormente pasa por una válvula de expansión disminuyendo presión y temperatura conservando entalpía, para luego absorber calor del agua en el reservorio cambiando su estado de líquido a gas.

La entalpía real h'_1 se calcula mediante la ecuación del cambio de entalpía a presión constante mostrada en la Ecuación 1.

$$h'_1 = h(T'_1, P_1) = h(T_1, P_1) = h(T_1, P_1) + \int_{T_1}^{T'_1} C_{p_{ref}} dT \quad (1)$$

T'_1 y P_1 representan la temperatura real y la presión en el punto 1, $C_{p_{ref}}$ es el calor específico del refrigerante.

La caída de presión en la válvula de aspiración hacia el compresor se evalúa en el punto a, la entalpía se calcula mediante la ecuación del cambio de entalpía a temperatura constante como se indica en la Ecuación 2.

$$h_a = h(T'_1, P'_1) + \int_{P'_1}^{P_a} \left[v_a - T_a \frac{R_{ref}}{P'_1} \right] dT \quad (2)$$

donde, R_{ref} es la constante del refrigerante, P'_1 la presión real en el punto 1, v_a y T_a el volumen específico del refrigerante y temperatura en el punto a respectivamente.

Se considera una caída de presión a la salida del condensador por efecto de la fricción del refrigerante al pasar por este componente. Para el cálculo de la entalpía del refrigerante sobre la línea de entropía constante considerando un proceso de compresión isentrópica se utiliza la Ecuación 3.

$$h_c = c_1 + c_2(T_c - T_b) + c_3(T_c - T_b)^2 + c_4(T_c - T_b)^3 + h_b \quad (3)$$

donde, c_1, c_2, c_3, c_4 son coeficientes calculados según las tablas ASHRAE del refrigerante R404a [25], T_b y T_c son temperaturas de saturación del refrigerante como vapor a las presiones P_b y P_c , h_b es la entalpía evaluada por el contacto que tiene el refrigerante con la superficie interna del compresor. Para los puntos: 1, b, c', 2, 3 y 4 presentes en la Figura 2, el cálculo de las entalpías se realiza de acuerdo con la tabla de propiedades del refrigerante.

Se evalúa la eficiencia frigorífica del sistema, el coeficiente de desempeño en función del efecto refrigerante útil y la energía neta suministrada por el compresor, mientras que, la cantidad de refrigerante suministrado en el equipo se calcula en función de la capacidad de la unidad condensadora \dot{Q} , como se observa en la Ecuación 4.

$$\dot{m}_{refrigerante} = \frac{\dot{Q}}{h_b - h_4} \quad (4)$$

2.1.2. Análisis de transferencia de calor.

Para el modelo se consideró tres situaciones básicas:

- 1) Flujo de calor ambiental hacia el interior del tanque: El calor fluye desde un foco caliente hacia un foco frío [26,27], es decir, si en el interior del tanque se tiene agua a baja temperatura y hielo sobre el evaporador, el calor se transmitirá por convección libre del aire hacia las paredes externas del tanque, siendo esta la primera etapa del fenómeno. En la segunda etapa el calor se

transmite por conducción desde las paredes externas del tanque hacia la capa de aislante y posteriormente a las paredes internas hasta llegar al agua, aquí la transferencia se estudia como convección libre.

- 2) Enfriamiento de agua sin formación de hielo: Se transfiere calor del agua hacia el refrigerante en dos etapas: la transferencia de calor libre entre el agua y la superficie exterior del evaporador y la transferencia de calor desde la superficie externa del evaporador hacia el refrigerante.
- 3) Formación de hielo sobre el evaporador: En la fase de congelación se supone dos etapas, la primera describe la transferencia de calor del agua hacia la capa de hielo, mientras que, la segunda etapa supone la transferencia de calor desde la capa superficial de hielo hacia el fluido refrigerante.

Los datos necesarios para la evaluación por transferencia de calor se toman basándose en la temperatura filmica calculada en función de la temperatura superficial y la temperatura del fluido T_∞ .

El incremento de calor debido al ambiente se deduce en función del coeficiente global de transferencia de calor U , el área de transferencia de calor A y las variaciones de temperatura entre el aire exterior y el agua, $T_{\infty \text{aire_externo}}$ y T_{mW} respectivamente.

$$\dot{Q}_{pared} = \frac{T_{\infty \text{aire_externo}} - T_{mW}}{\frac{1}{h_{\infty a}} + \frac{2e_{ac}}{k_{ac}A} + \frac{e_p}{k_pA} + \frac{1}{h_{\infty w}A}} \quad (5)$$

El flujo de calor que atraviesa la pared del tanque está definido por la Ecuación 5, donde e_{ac} es el espesor de la lámina de acero inoxidable 304, e_p es el espesor del poliuretano, k_{ac} es el coeficiente de conductividad del acero inoxidable 304, k_p representa el coeficiente de conductividad del poliuretano, $h_{\infty a}$ y $h_{\infty w}$ son los coeficientes convectivos promedio del aire exterior y agua respectivamente.

Para el estudio del enfriamiento de agua sin formación de hielo se evaluó el coeficiente por convección forzada de ebullición $h_{\infty ref}$, que es igual al valor máximo entre el coeficiente de ebullición de las regiones de ebullición nucleada dominante h_{NBD} , y el coeficiente de ebullición de las regiones de ebullición convectiva dominante, calculados a través de las Ecuaciones 6 y 7.

$$h_{NBD} = [0,6683Co^{-0,2}f_2(Pr_{lo}) + 1058Bo^{0,7}F_{fl}] \cdot (1-x)^{0,8}h_{lo} \quad (6)$$

$$h_{CBD} = [1,136Co^{-0,9}f_2(Pr_{lo}) + 667,2Bo^{0,7}F_{fl}] \cdot (1-x)^{0,8}h_{lo} \quad (7)$$

Se tomó en cuenta el número de convección Co , el factor de fricción del refrigerante f_2 , el número de Froude Fr_{lo} , el punto de ebullición Bo , el parámetro de asociación superficie-fluido F_{fl} , la calidad del fluido refrigerante x , el coeficiente de transferencia de calor h_{lo} , [28] presenta la forma de cálculo de estos coeficientes.

Se determinaron dos cargas térmicas, \dot{Q}_{s1} que toma en cuenta la resistencia térmica del agua solamente y \dot{Q}_{s2} que considera las resistencias térmicas por las paredes del evaporador y el refrigerante. Las dos cargas térmicas están definidas por las Ecuaciones 8 y 9.

$$\dot{Q}_{s1} = 2\pi r_e L h_{\infty w} (T_{mw} - T_{s1}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{s2} = \frac{T_{s1} - T_1}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{2\pi r_i L h_{\infty ref}}} \quad (9)$$

donde, L representa la longitud de tubería del evaporador, r_i y r_e los radios interno y externo del evaporador, k_c el coeficiente de conductividad térmica del cobre y T_{s1} la temperatura de la capa superficial agua-evaporador.

En la fase de formación de hielo sobre el evaporador se calcula la carga térmica por transferencia de calor de agua hacia la capa superficial de hielo \dot{Q}_{s3} (Ecuación 10) y la carga térmica por transferencia de calor desde la superficie de hielo hacia el refrigerante \dot{Q}_{s4} (Ecuación 11).

$$\dot{Q}_{s3} = 2\pi(r_e + 2e)Lh_{\infty w2}(T_{mw} - T_o) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{s4} = \frac{T_o - T_1}{\frac{\ln\left(\frac{r_e+e}{r_i}\right)}{2\pi k_h L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{2\pi r_i L h_{\infty ref}}} \quad (11)$$

donde, e representa el espesor de hielo formado en un tiempo t , $h_{\infty w2}$ el coeficiente convectivo del agua utilizado en la transferencia de calor agua-evaporador, T_{mw} la temperatura media aritmética del agua evaluada en función de las temperaturas inicial T_{0_agua} y final T_{f_agua} del agua y k_h el coeficiente de conductividad del hielo.

El tiempo necesario para enfriar el agua del reservorio de una temperatura ambiental a una temperatura requerida, varía directamente con respecto a \dot{Q}_{s1} . La Ecuación 12 permite calcular el tiempo de enfriamiento de agua en horas, se considera la masa del agua en el tanque m_{agua} en kg, el calor específico del agua Cp_{agua} en $kJ/kg^\circ C$. La carga neta \dot{Q}_{neto} con la que cuenta

el sistema para enfriamiento de agua y generación de hielo es igual a la diferencia entre la capacidad de la unidad condensadora y la carga total perdida.

$$t_{enf_agua} = \frac{1000m_{agua}Cp_{agua}(T_{0_agua} - T_{f_agua})}{3600(\dot{Q}_{neto} - \dot{Q}_{s1})} \quad (12)$$

El espesor de hielo generado en un tiempo t (Ecuación 13) se determina en función del flujo de calor latente Q_{lat} . Este valor es el resultado de la diferencia entre la carga térmica por transferencia de calor de agua hacia la capa superficial de hielo y la carga térmica por transferencia de calor desde la superficie de hielo hacia el refrigerante.

$$e = \frac{\sqrt{\frac{4t(Q_{lat})}{1000\pi\rho_h Lh_{sf}} + D_e^2} - D_e}{2} \quad (13)$$

donde, D_e es el diámetro externo del evaporador en metros, ρ_h la densidad de hielo en kg/m^3 , h_{sf} el calor latente de fusión del agua en kJ/kg . Mientras que, la masa de hielo generada m_h se determina a través de la Ecuación 14.

$$m_h = \frac{\pi}{4} ((D_e + 2e)^2 - D_e^2) L\rho_h \quad (14)$$

En un tiempo inicial el agua en el tanque se encuentra a temperatura ambiente, con el funcionamiento del equipo, la temperatura disminuye hasta llegar a una temperatura igual o cercana a $0^\circ C$. La temperatura final a la que llegará el agua en un determinado tiempo se calcula en función de la diferencia entre la carga neta y la carga estimada por la resistencia térmica del agua solamente \dot{Q}_{s1} (Ecuación 15).

$$T_{f_agua} = T_{0_agua} - \frac{t(\dot{Q}_{neto} - \dot{Q}_{s1})}{m_{agua}Cp_{agua}} \quad (15)$$

$$T_{f2_agua} = T_{0_agua} - \frac{t(\dot{Q}_{neto} - \dot{Q}_{s3})}{m_{agua}Cp_{agua}} \quad (16)$$

En tanto que, la Ecuación 16 se utiliza para evaluar la temperatura del agua considerando la existencia de hielo sobre el evaporador, para esto se utilizará la carga calculada por la resistencia térmica del agua en el proceso de congelación \dot{Q}_{s3} .

2.2. Simulación numérica de la generación de hielo tubular

El programa realizado en el entorno *Guide* de Matlab permite la modificación continua de datos de temperatura y presión ambientales, de agua y refrigerante necesarios para el análisis termodinámico y de transferencia de calor. *Guide* permitió diseñar de forma gráfica la interfaz en el editor de diseño mientras se

generaba de manera automática el código de Matlab para construirla. Al guardar las modificaciones realizadas en la interfaz se crearon dos archivos, uno es .fig y el otro .m, las líneas de código que contiene el segundo archivo son las que crean la interfaz que se tiene en el archivo .fig. En la zona de comandos del *push button* «Calcular» se insertó la programación a ejecutarse.

La secuencia de programación involucra el ingreso de datos tipo texto que luego serán convertidos a tipo *double* para utilizarlos en la resolución de ecuaciones presentes en la programación, el cálculo de parámetros a ser evaluados y visualización de resultados en tablas y una gráfica presentando el diagrama Presión-Entalpia definido en el ciclo termodinámico. Las ecuaciones evaluadas para simular el funcionamiento del generador de hielo fueron definidas en la modelación matemática. La interfaz creada para el proceso consta de ciclos iterativos para aproximación de resultados y evaluación del fenómeno a distintos valores de calidad de fluido y de espesor de hielo generado.

Para la simulación se plantearon tres escenarios de funcionamiento en base a horas de la mañana, tarde y noche. Esta información permitió crear curvas de variación de espesor, velocidad de formación de hielo, temperatura del agua en el tanque y temperatura de capa superficial en el evaporador.

2.3. Análisis experimental

El procedimiento utilizado para la puesta en marcha del equipo y la adquisición de datos se detallan en la Figura 3. Se establecieron las condiciones iniciales de operación del equipo al estabilizar la presión de trabajo.

Se registraron valores de temperaturas al ingreso y salida del evaporador, a la salida del condensador, en el centro del reservorio y a distancias de 3, 12 y 25 milímetros de la capa superficial agua-evaporador. El crecimiento del espesor de hielo también fue registrado por medio de una cámara fotográfica.

3. Resultados y discusión

Datos técnicos de fabricantes y valores de funcionamiento registrados fueron necesarios para cálculos y discusión de resultados. Las presiones de baja y alta de funcionamiento del sistema fueron 0,5 y 1,4 MPa (75 y 203 psig) respectivamente. Se determinó que el refrigerante llega al evaporador como una mezcla de líquido y vapor saturado con una calidad del 29 %. Las temperaturas de trabajo fueron $-5^\circ C$ en el evaporador y $28,9^\circ C$ en el condensador.

Mediante simulación se evaluaron los parámetros de funcionamiento indicando lo siguiente:

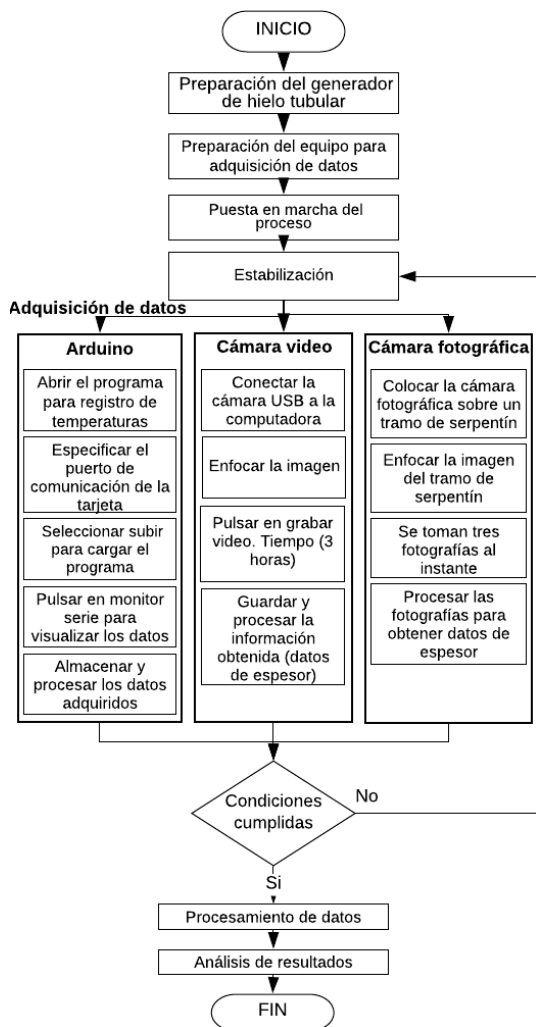


Figura 3. Diagrama de procesos del análisis experimental.

- La generación de hielo en un tiempo determinado para las diferentes experiencias, inició cuando la capa de fluido más cercana al evaporador se enfrió hasta la temperatura de cambio de fase, esto se observó como un desplazamiento en el origen de cada curva mayor a 0,2 h.

- El acelerado incremento de la velocidad de formación de hielo y su posterior estabilización representa el enfriamiento rápido que ocurre en las capas de agua más próximas a la tubería del evaporador y su consecuente congelación, menores velocidades se registraron al incrementar el espesor de hielo, esta velocidad fue mayor en las primeras 1,5 h.
- La temperatura del agua decreció a razón de $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante las dos primeras horas, después de ese tiempo este valor decreció considerablemente hasta llegar a $0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ al pasar las 3 horas de funcionamiento. Con temperaturas ambientales bajas, el tiempo de generación de hielo fue menor.
- El cambio de temperatura de capa superficial en el evaporador presentó dos variaciones, la primera corresponde a la tasa de cambio del calor sensible, hasta llegar a una temperatura de 0°C . Posteriormente la variación tiende a detenerse por un rango de 0,25 h, este fenómeno responde a un cambio de fase del agua en los sectores más cercanos a la pared de la tubería. Transcurrido el tiempo de cambio de fase inicia el subenfriamiento de hielo para finalmente estabilizarse a -7°C .
- Mediante simulación numérica se registró una eficiencia de refrigeración promedio del 70 % y un coeficiente de desempeño (COP) promedio de 5,5.

Experimentalmente se recolectaron datos de temperaturas y espesor de hielo en el tiempo, datos principales de las experiencias representativas consideradas para el estudio se detallan en la Tabla 1.

Las prácticas 1, 2, 3 y 4 se realizaron considerando convección natural del agua. Por el contrario, la práctica 5 fue realizada contemplando convección forzada. La Figura 4 muestra el proceso de formación de hielo observado en la práctica 2. Los resultados obtenidos de forma experimental se sintetizan a continuación.

Tabla 1. Datos principales de las experiencias objeto de estudio

N.º Práctica	Temperatura ambiental $^{\circ}\text{C}$	Temperatura inicial del agua $^{\circ}\text{C}$	Variación de temperatura del condensador		Variación de presión del condensador	
			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	MPa	psi
1	20,5	16	11,3	20,34	0,028	4
2	22,5	21,5	11	19,8	0,034	5
3	20	18	8,6	15,48	0,028	4
4	21,5	19,4	8,8	15,84	0,034	5
5	20	17	10,3	18,54	0,034	5

- La formación de hielo fue nula en un rango de tiempo de 0 a 8 minutos, durante este período, la capa de fluido más cercana al evaporador se enfrió para luego cambiar de fase.
- Las condiciones de baja temperatura hicieron que la velocidad de formación de hielo sea mayor, obteniéndose espesores de hielo de 22 a 25 mm en 3 horas de funcionamiento.
- En un tiempo de funcionamiento mayor a 3 horas, la generación de hielo disminuyó considerablemente, transcurridas 5 horas de funcionamiento el espesor de hielo aproximado fue de 35 mm como se observa en la Figura 5.
- El funcionamiento del equipo en convección forzada, presentó mayor velocidad de enfriamiento de agua y menor crecimiento de hielo, en comparación con los cálculos de prácticas en convección libre.
- En el transcurso de 5 a 10 minutos después de iniciada la práctica, con una temperatura 2 °C menor que la temperatura inicial, comienza el cambio de fase de la película de fluido más cercana al evaporador. Las velocidades de generación de hielo van desde los 3 a 9 mm/h.
- La temperatura del refrigerante en el evaporador varía en forma descendente desde -3 °C a -5 °C, indicando la variación de la capacidad frigorífica del equipo de acuerdo con la demanda en ese instante.



Figura 4. Espesor de hielo en intervalos de tiempo. Práctica 2.

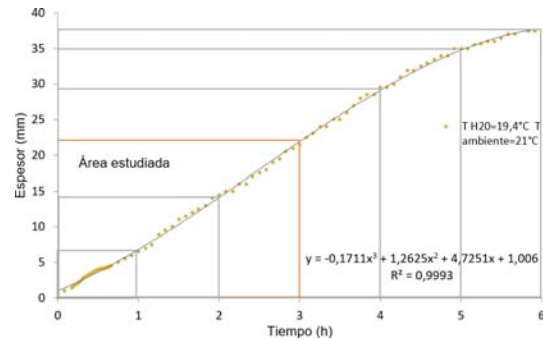


Figura 5. Espesor de hielo vs. Tiempo T h20=19,4 °C.

- La temperatura del refrigerante a la salida del condensador se estabiliza a los 15 minutos de encendido el equipo, en un rango de 28 °C a 34 °C. Este valor se encuentra principalmente en dependencia de la temperatura ambiental, temperatura del agua y presión de alta del sistema considerando las pérdidas existentes.
- El valor de carga térmica total se obtuvo mediante la suma del calor sensible y calor latente para un instante de tiempo determinado, tomando en cuenta los datos de temperatura del agua en el tanque, la masa de hielo y la masa de agua, este valor llega a un punto de equilibrio cuando las pendientes de las curvas de flujo de calor sensible y latente tienen valores aproximados, es decir, cuando la carga térmica necesaria para enfriar el agua disminuye en la misma proporción en la que aumenta la carga térmica para generación y subenfriamiento de hielo. No se observó variación considerable de carga térmica a partir de 1,5 h de funcionamiento. Transcurridas 3 horas, la carga térmica total varía en el rango de 858 W a 892 W. En la Figura 6 a), los dos picos más altos (cargas térmicas mayores) son el resultado de experiencias realizadas por la tarde, mientras que los dos picos siguientes son el resultado de experiencias realizadas por la noche, indicando una relación directa con la temperatura ambiental y temperatura del agua.
- Los valores de carga térmica obtenidos de 0 a 0,5 horas son mayores a los obtenidos 3 horas después. Los picos observados en las curvas responden al requerimiento de mayor capacidad frigorífica para enfriamiento de agua. A los 10 minutos de funcionamiento del equipo del 100 % de capacidad frigorífica requerida, el 90 % corresponde al calor necesario para enfriamiento de agua, pero, a las 3 horas de funcionamiento del equipo, el 40 % de la capacidad frigorífica requerida se utiliza para enfriamiento de agua.

- El consumo del compresor en 3 horas de funcionamiento varió en el rango de 165 W a 173 W, para retirar una carga térmica de 859 W a 892 W. Las curvas de la Figura 6 b) indican la variación de la potencia consumida por el compresor de acuerdo con la capacidad frigorífica requerida.

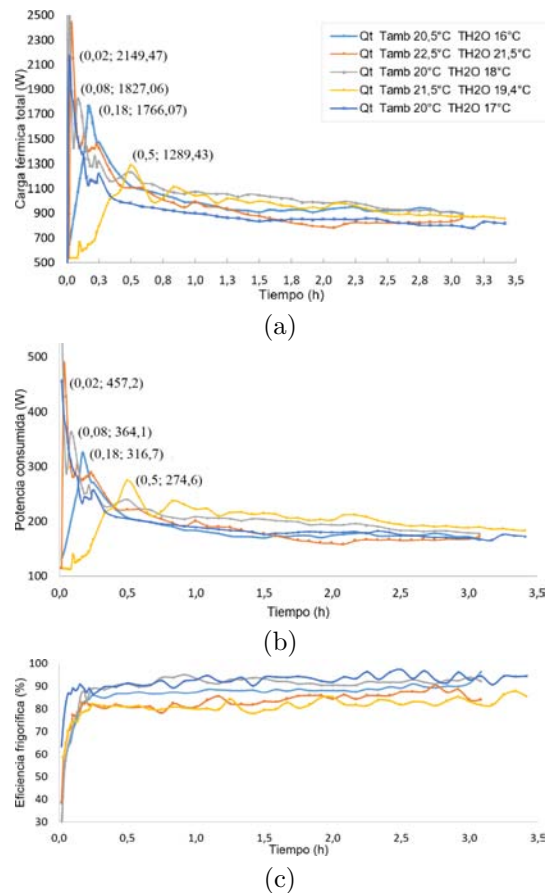


Figura 6. Resultados experimentales. a) Carga térmica total vs. tiempo. b) Potencia consumida por el compresor vs. tiempo. c) Eficiencia frigorífica vs. tiempo.

- Por cada vatio consumido por el compresor, se retiró aproximadamente 5 W de energía térmica del agua en el tanque reservorio.
- El COP observado para distintas temperaturas de ambiente y agua varía en el rango de 5,8 a 6,1; mientras que, la eficiencia frigorífica fluctúa entre valores de 78 % y 95 %.
- En la experiencia realizada a temperatura inicial de agua de 17 °C y temperatura ambiental de 20 °C en convección forzada, se obtuvo la menor carga térmica retirada igual a 794,11 W, la temperatura del agua al final de la experiencia fue de 0 °C, el COP obtenido fue de 5,92 y la eficiencia frigorífica del 90,7 % (Figura 6c). Si se comparan estos valores con los resultados obtenidos en la

experiencia realizada con la temperatura inicial de agua más baja (convección natural), los resultados de potencia absorbida, COP y eficiencia frigorífica son muy similares, en tanto que, al igualar los valores de temperatura final de agua y espesor de hielo si existe una diferencia notoria de $-0,4$ °C y 5 mm respectivamente. En consecuencia, utilizar convección forzada en el agua sí mejoró la eficiencia frigorífica del equipo, como se indica en [11], pero poner en funcionamiento el equipo en condiciones como las observadas en la práctica realizada a temperatura inicial de agua de 16 °C resultó ser la mejor opción.

Una validación de resultados experimentales se realizó con el fin de observar el porcentaje de error de los datos generados con el modelo realizado. Se consideran los datos de la práctica 1.

La Figura 7a presenta la variación de temperatura de agua obtenida por simulación y de forma experimental. La curva obtenida por simulación presenta gran similitud con los datos de temperatura obtenidos en la experiencia. 10 minutos después de iniciada la experiencia se obtuvo una temperatura de agua de 12,8 °C, mientras que, por simulación la temperatura fue de 14 °C; esta es la mayor variación observada al comparar los datos. La curva obtenida por simulación presenta una tendencia polinómica de quinto orden con un coeficiente R2 de 0,99.

Curvas obtenidas mediante datos de espesor de hielo por simulación y de forma experimental se presentan en la Figura 7b. Se observa una variación en la primera hora de funcionamiento con una diferencia máxima de espesor de hielo de 2 mm, esto debido a que la generación de hielo inició a los 10 minutos de encendido el equipo, mientras que, por simulación inició media hora después. La curva presenta una tendencia polinómica de tercer orden con un coeficiente R2 de 0,998.

Por otro lado, la Figura 7c presenta datos de variación de temperatura de la capa superficial entre el evaporador y el agua (T_{s1}) por simulación y de forma experimental. Para definir el cambio de esta temperatura se necesita utilizar dos ecuaciones, la primera ecuación define la variación de temperatura en el enfriamiento y cambio de fase, mientras que la segunda ecuación indica un subenfriamiento. Las curvas presentadas tienen una tendencia polinómica de tercer y sexto orden con un coeficiente R2 de 0,996.

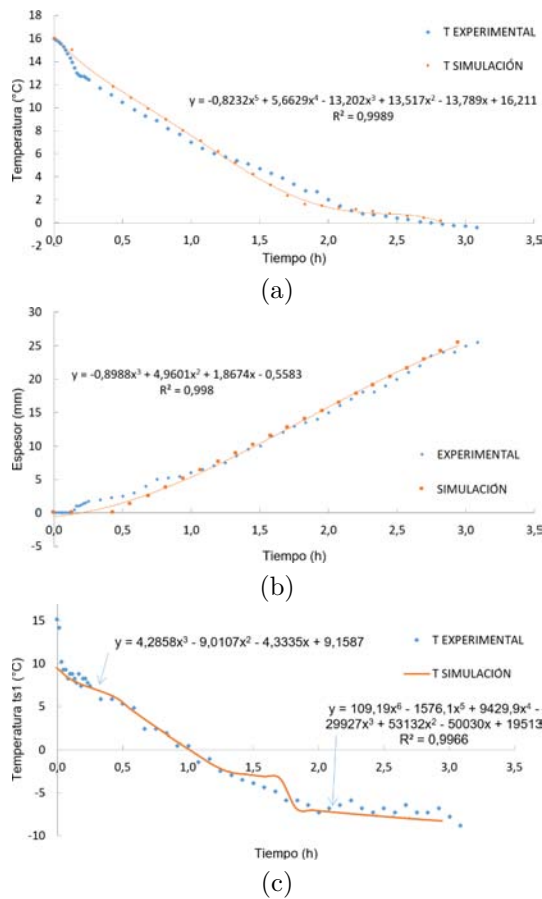


Figura 7. Datos de temperatura y espesor de hielo obtenidos por simulación y de forma experimental: a) Temperatura del agua vs. tiempo. b) Espesor de hielo vs. tiempo c) Temperatura de capa superficial vs. tiempo.

Una situación particular ocurre con la gráfica de velocidad de formación de hielo en el tiempo observada en la Figura 8. Experimentalmente el espesor de hielo se incrementa a mayor velocidad y después de una hora se estabiliza, mientras que, por simulación se esperaba una velocidad de formación de hielo creciente en el tiempo que iniciaba después de media hora de funcionamiento del equipo. Esta diferencia se presenta

a causa de inestabilidades en el proceso de formación de hielo. Al transcurrir una hora, las dos curvas se aproximan indicando igualdad. A partir de la tercera hora de funcionamiento del equipo, la velocidad de formación de hielo tiende a mantenerse con mínimas variaciones (aproximadamente 1 mm por hora).

La Tabla 2 presenta una síntesis de los resultados obtenidos de las diferentes experiencias en el transcurso de 3 horas. Se determinó el error encontrado de los datos de simulación (S) con respecto a los obtenidos de forma experimental (E), observando lo siguiente:

Las diferencias contempladas al comparar los datos de temperatura final del agua y espesor de hielo obtenidos por simulación y experimental, se dan a causa de la inestabilidad observada en el proceso de formación de hielo durante la primera hora de experiencia. Para la temperatura final del agua, el porcentaje de error calculado se encuentra en el rango del 1,78 al 80 %, el rango es elevado debido a que los valores obtenidos por simulación indicaban menores temperaturas, el modelo matemático consideró una variación de temperatura constante en el condensador, esta variación de temperatura tiene bastante similitud con la variación de temperatura observada en pruebas realizadas durante la mañana y tarde, pero en pruebas realizadas por la noche la variación de temperatura disminuyó considerablemente obteniendo temperaturas finales de agua más elevadas que las esperadas. Para los datos de espesor de hielo generado, el porcentaje de error calculado varía en un rango de 0,39 % al 15,24 %.

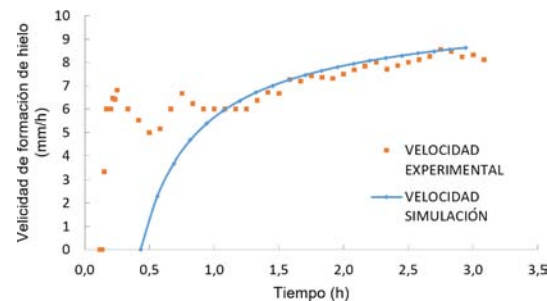


Figura 8. Velocidad de formación de hielo vs. tiempo.

Tabla 2. Resultados de cálculos realizados para las diferentes prácticas en 3 horas

Parámetros	Valores			Valores			Valores			Valores		
	E	S	% Error	E	S	% Error	E	S	% Error	E	S	% Error
Temperatura inicial de agua (°C)		16 °C			21,5 °C			18 °C			19,4 °C	
T final agua (°C)	-0,4	-0,41	1,78	1,1	0,93	15,45	-0,5	-0,1	80	1	1,78	78
Ts1 (°C)	-7,82	-8,27	5,75	-7,33	-5,87	19,99	-6,35	-7,59	19,45	-7,82	-7,67	1,92
Espesor (mm)	25,5	25,4	0,39	21	17,8	15,24	23,5	22,9	2,55	23	22,9	0,43
Velocidad de formación de hielo (mm/h)	8,27	8,63	4,32	6,81	5,99	12,12	7,62	7,59	0,41	7,26	7,52	3,54
Q total (W)	905,38	1139,28	25,83	858,55	1139,93	32,77	901,05	1140,45	26,57	869,93	1139,93	31,04
Trabajo compresor (W)	168,64	163,93	2,79	172,69	204,2	18,25	178,58	163,93	8,21	185,95	163,93	11,84
Energía consumida (Wh)	519,99	491,8	5,42	532,45	612,6	15,05	550,64	491,79	10,69	588,85	491,79	16,48
COP	5,97	7,02	17,7	5,85	5,63	3,7	5,94	7,02	18,26	5,85	7,02	20,04
Eficiencia frigorífica (%)	91,39	74,22	18,79	84,02	71,27	15,17	91,87	74,22	19,21	86,19	74,22	13,88
Tiempo a 1 °C (h)	2,17	2,2	1,7	3,08	3,17	2,81	2,5	2,36	5,6	3,08	2,66	13,73
Espesor a 1 °C (mm)	17	17,8	4,71	21	21	0	19	18,1	4,74	22,5	19,77	12,13

Una diferencia relevante se observa en el porcentaje de error de la capacidad frigorífica a retirar por simulación y experimental. Como en la simulación se tomó el valor dado en el catálogo del producto, esta es una capacidad frigorífica óptima para selección, pero no es la real, al compararlo con el valor real se observa una diferencia importante ya que el porcentaje de error varía del 25,83 al 32,77 %.

Los porcentajes de error evaluados para la velocidad de formación de hielo, trabajo del compresor, energía consumida, COP y eficiencia frigorífica no sobrepasaron el 20 %. Para el estudio paramétrico realizado, el margen de error encontrado es aceptable.

4. Conclusiones

Se desarrolló un modelo matemático con base en el estudio del ciclo térmico y transferencia de calor existente y un código de programación para simulación en Guide de MATLAB. El programa creado permite variar datos del equipo, funcionamiento, ambiente y fluido de trabajo con el fin de observar el cambio en eficiencia, potencia consumida y su interacción en el tiempo. Las curvas obtenidas por simulación fueron validadas al compararlas con las curvas obtenidas con datos experimentales y evaluar el porcentaje de error que existe entre estos resultados.

Los principales parámetros que intervinieron en el proceso de formación de hielo y almacenamiento de energía térmica fueron las condiciones ambientales del lugar en donde se instaló el equipo y la temperatura del agua utilizada. El equipo instalado en Riobamba disminuyó su capacidad frigorífica a la presentada por el catálogo debido a la presión barométrica del lugar y la temperatura ambiental en días soleados.

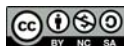
La inestabilidad observada en el proceso de formación de hielo, en el transcurso de la primera hora de experiencia, interviene directamente en la temperatura final del agua. Al iniciar la formación de hielo 15 minutos antes de lo observado por simulación, se retiró más calor de lo calculado, obteniendo una temperatura final de agua menor a la observada por simulación. La temperatura final de agua varió en el rango de 1,1 °C a -0,4 °C en 3 horas.

La mayor eficiencia encontrada y el menor consumo energético se observaron en experiencias realizadas por la noche, cuando las temperaturas ambientales descenden, disminuyendo la carga térmica y mejorando la eficiencia del condensador, el cual influye directamente sobre la eficiencia del equipo. Para el funcionamiento por la noche con la temperatura de agua igual a 16 °C.

Referencias

- [1] A. Saito, "Recent advances in research on cold thermal energy storage," *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, no. 2, pp. 177–189, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00078-0)
- [2] I. Dincer, "On thermal energy storage systems and applications in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 4, pp. 377–388, 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001268>
- [3] J. H. M. Neto and M. Krarti, "Parametric analysis of an internal-melt ice-on-coil tank," *ASHRAE*, vol. 103, no. 2, pp. 322–333, 1997. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PyxJ3r>
- [4] S. Sanaye and A. Shirazi, "Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications," *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 100–109, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.040>
- [5] O. J. Venturini, M. d. S. Valente de Almeida, and E. Silva, "Optimización de un sistema de termoacumulación en un tanque de hielo con expansión directa," *Asociacion Brasileña de Ingeniería y Ciencia Mecánicas*, 1999. [Online]. Available: <http://bit.ly/2WaawaN>
- [6] M. H. Rahdar, A. Emamzadeh, and A. Ataei, "A comparative study on pcm and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings," *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 391–399, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107>
- [7] Z. Kang, R. Wang, X. Zhou, and G. Feng, "Research status of ice-storage air-conditioning system," *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 1741–1747, 2017, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.020>
- [8] P. A. Intemann and M. Kazmierczak, "Heat transfer and ice formations deposited upon cold tube bundles immersed in flowing water-i. convection analysis," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 3, pp. 557–572, 1997. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00121-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00121-4)
- [9] M. H. Rahdar, M. Heidari, A. Ataei, and J.-K. Choi, "Modeling and optimization of r-717 and r-134a ice thermal energy storage air

- conditioning systems using nsga-ii and mopso algorithms,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 217–227, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.068>
- [10] J. Pu, G. Liu, and X. Feng, “Cumulative exergy analysis of ice thermal storage air conditioning system,” *Applied Energy*, vol. 93, pp. 564–569, 2012, (1) Green Energy; (2) Special Section from papers presented at the 2nd International Energy 2030 Conf. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.003>
- [11] Y. Li, C. Yang, Z. Yan, B. Guo, H. Yuan, J. Zhao, and N. Mei, “Analysis of the icing and melting process in a coil heat exchanger,” *Energy Procedia*, vol. 136, pp. 450–455, 2017, 4th International Conference on Energy and Environment Research ICEER 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.302>
- [12] ARCONEL. (2019) Balance nacional de energía eléctrica. [Online]. Available: <http://bit.ly/2PiU2eS>
- [13] CONELEC. (2013) Plan maestro de electrificación 2013-2022. aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental. [Online]. Available: <http://bit.ly/33UgUFA>
- [14] S. Sanaye and A. Shirazi, “Four e analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 3, pp. 828–841, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.014>
- [15] X. Song, T. Zhu, L. Liu, and Z. Cao, “Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors,” *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 288–300, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.007>
- [16] H. H. Sait, “Experimental study of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application utilizing falling film,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 146, pp. 135–145, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.116>
- [17] G. D. Shinde and P. R. Suresh, “A review on influence of geometry and other initial conditions on the performance of a pcm based energy storage system,” *International Journal of Thermal Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 214–222, 2014. [Online]. Available: <http://bit.ly/31KAL8A>
- [18] R. A. Jordan, L. A. B. Cortez, V. Silveira Jr., M. E. R. M. Cavalcanti-Mata, and F. D. de Oliveira, “Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking,” *Engenharia Agrícola*, vol. 38, pp. 510–517, 08 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E6ZACD>
- [19] K. A. R. Ismail, M. M. Gonçalves, and F. A. M. Lino, “Solidification of pcm around a finned tube: Modeling and experimental validation,” *Journal of Basic and Applied Research International*, vol. 12, no. 2, pp. 115–128, 2015. [Online]. Available: <http://bit.ly/3410fjU>
- [20] R. P. Guapulema Maygualema and E. A. Jácome Domínguez, “Diseño y construcción de un generador de hielo tubular para laboratorio,” 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/2REtbq9>
- [21] H. H. Sait, A. Hussain, and A. M. Selim, “Experimental investigation on freezing of water falling film on vertical bank of cold horizontal tubes,” *Journal of thermal science and engineering applications*, vol. 4, no. 4, p. 041006, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4006314>
- [22] F. Wang, C. Liang, M. Yang, C. Fan, and X. Zhang, “Effects of surface characteristic on frosting and defrosting behaviors of fin-tube heat exchangers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 1126–1132, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.090>
- [23] H. G. Ramírez-Hernández, F. A. Sánchez-Cruz, F. J. Solorio-Ordaz, and S. Martínez-Martínez, “An experimental study of heat transfer on a tube bank under frost formation conditions,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 102, pp. 35–46, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.031>
- [24] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, mcgraw-hill ed., 2000. [Online]. Available: <http://bit.ly/344CVlj>
- [25] ASHRAE, *ASHRAE handbook : fundamentals*, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LMExtf>
- [26] Y. Çengel and M. Boles, *Termodinámica*, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E5v8J3>
- [27] J. P. Holman, *Transferencia de calor*, 1998. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PdyO1N>
- [28] F. Taboas Touceda, “Estudio del proceso de ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua en intercambiadores de placas para equipos de refrigeración por absorción,” Ph.D. dissertation, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/34b58Xk>



CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES ACCIONADO POR UN INVERSOR TRIFÁSICO MULTINIVEL

SPEED CONTROL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ACTUATED BY A THREE-PHASE MULTI LEVEL INVERTER

Rosalino Mayoral Lagunes¹, José Antonio Juárez Abad², Beatriz Angélica Aguilar
López¹, Jesús Linares Flores², Jorge Luis Barahona Ávalos²

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un controlador robusto para el seguimiento de velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes (MSIP). Se propone un controlador lineal basado en la retroalimentación dinámica de la salida pasiva estática del error exacto. El controlador pasivo propuesto requiere del conocimiento del par de carga, por lo que el mismo es estimado con un observador tradicional de orden reducido. El MSIP es impulsado por medio de un inversor multinivel trifásico de celdas en cascada de cinco niveles. Para la implementación del controlador, estimador y modulador multinivel se emplea un arreglo de compuertas programable en campo (FPGA) de la familia Spartan-6 XC6SLX9. El procesamiento en paralelo que provee este dispositivo permite obtener un tiempo de muestreo de 10 us. Los resultados de simulación y experimentales muestran que el controlador propuesto tiene un excelente desempeño.

Palabras clave: PMSM, control por pasividad, inversor multinivel, FPGA

Abstract

This paper presents the design and FPGA embedded implementation of robust controller design to speed tracking problem for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM). Then, a linear controller based on the exact static error dynamics passive output feedback (ESEDPOF) is proposed, where the uncertainty estimation is taken into account. The technique of passivity requires knowing the load torque, this is estimated with a traditional reduced-order observer. PMSM is driven by a five levels Three-Phase Cascaded Cell Multi-Level Inverter (3 Φ -CCMLI). The medium-scale field-programmable gate array (FPGA) Spartan-6 XC6SLX9 is used for implementing the ESEDPOF controller, the reduced-order observer, and the multilevel pulse width modulator. The parallel processing provided by these devices allowed to obtain a sampling time of 10us. Simulation and Experimental validation shows an excellent dynamical performance.

Keywords: PMSM, Passivity Based Control, Multi Level Inverter, FPGA.

^{1,*}División de Estudios de Posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca – México.

<http://orcid.org/0000-0003-3420-7416>, <http://orcid.org/0000-0002-2769-4992>.

²Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca – México,

Autor para correspondencia ✉: jbarahona@mixteco.utm.mx. <http://orcid.org/0000-0001-7440-0849>,

<http://orcid.org/0000-0002-5723-4786>, <http://orcid.org/0000-0002-5502-6692>.

Recibido: 22-11-2019, aprobado tras revisión: 13-12-2019

Forma sugerida de citación: Mayoral Lagunes, R.; Juárez Abad, J. A.; Aguilar López, B. A.; Linares Flores, J. y Barahona Ávalos, J. L. (2020). «Control de velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes accionado por un inversor trifásico multinivel». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 97-108. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.09>.

1. Introducción

Los motores eléctricos son actuadores que se utilizan en la mayoría de la maquinaria industrial y en electrodomésticos; su posición y/o velocidad son controladas para que puedan cumplir con alguna tarea específica, entre las que podemos encontrar: máquinas CNC, bandas transportadoras, robótica y otros procesos industriales. Dentro de estas aplicaciones es común encontrar motores síncronos de imanes permanentes (MSIP), los cuales tienen una mejor precisión en términos de velocidad y posición debido a su propiedad de sincronía. Recientemente, los controladores que permiten modificar dichas magnitudes se realizan por medio de dispositivos reprogramables y reconfigurables, tales como DSP y FPGA respectivamente [1, 2].

Para este tipo de motores se han propuesto diversos esquemas de control tales como el control basado en pasividad mostrado en [3] y el de un controlador basado en la técnica Backstepping para el seguimiento de posición el cual se muestra en [4].

Los MSIP deben ser accionados por medio de un inversor trifásico, el cual preferentemente deberá entregar una onda de voltaje con la menor cantidad de armónicos posibles, ya que en caso contrario se pueden generar algunos daños bien conocidos, tanto en la parte eléctrica como en la parte mecánica del motor [5]. En este trabajo, se construye un inversor trifásico multinivel de cinco niveles, con el cual se reduce el contenido armónico y mejorar así la calidad del voltaje de alimentación hacia el motor [6]. Una característica adicional de este tipo de convertidor es que maneja mayor potencia, pues esta se distribuye en los arreglos en serie que conforman los dispositivos de conmutación [7–9].

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera, en la sección 2 se describe brevemente el sistema a controlar, a continuación, en la sección 3 se describe la metodología empleada centrada para la implementación de sistemas de procesamiento en FPGA tomada de [10–14]; dicha metodología posee dos fases las cuales son tratadas en las secciones 4 y 5. Posteriormente en la sección 6 se describe la construcción del convertidor de potencia empleado, en este caso el inversor trifásico multinivel de cinco niveles y finalmente en la sección 7 se presentan los resultados experimentales obtenidos.

2. Descripción del sistema

Se implementa un control basado en pasividad para el seguimiento suave de la velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes, accionado por un inversor trifásico de topología en cascada de 5 niveles. Esto se realiza empleando un dispositivo de lógica reconfigurable.

En la Figura 1 se muestra el esquema del sistema propuesto. El MSIP está accionando una carga mecánica desconocida, la alimentación del motor es suministrada por el inversor trifásico de 5 niveles. El controlador basado en pasividad, el procesamiento de señales y el modulador PS-PWM son implementados en un FPGA.

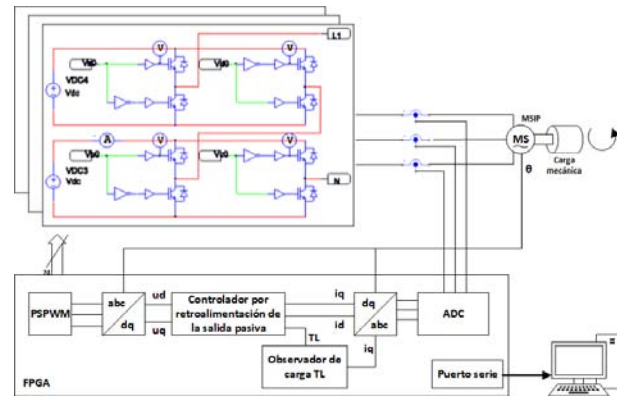


Figura 1. Esquema general del sistema.

3. Metodología

De acuerdo con la metodología empleada, tomada de [8], este trabajo se divide en 2 fases, la primera de las cuales, de manera general tiene que ver con el modelado del sistema y el análisis de las propiedades matemáticas de este modelo para realizar la formulación del controlador del sistema. La segunda fase trata sobre la implementación del algoritmo de control formulado en la fase 1 y los módulos complementarios los cuales serán implementados en el dispositivo de lógica reconfigurable. Cada una de estas fases se describe con mayor detalle a continuación.

La fase 1 se resume de manera gráfica en la Figura 2. Esta fase es independiente del dispositivo a utilizar en la implementación y se divide a su vez en 3 etapas:

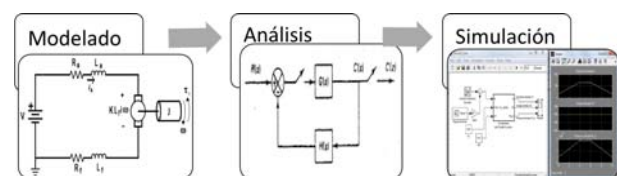


Figura 2. Fase 1 de la metodología.

1. **Modelado:** En esta etapa se modelan matemáticamente el MSIP y el inversor trifásico multinivel empleando las leyes o teoremas necesarios para la obtención de las ecuaciones diferenciales del sistema.
2. **Análisis:** Se analizan los modelos dinámicos de la combinación inversor-motor y por medio de

herramientas algebraicas, se diseña el controlador propuesto y se determina la factibilidad de todo el sistema.

3. **Simulación:** En esta etapa se simulan los modelos matemáticos obtenidos para confirmar la aproximación al sistema real; para ello se utiliza el *software* Matlab/Simulink en cosimulación con el *software* PSIM.

Para la fase 2, la metodología de diseño propuesta se resume en la Figura 3 la cual cuenta con 7 etapas. Esta propuesta es una solución equilibrada entre dos necesidades opuestas: 1) un método amigable que se adapta perfectamente a un ingeniero de control que no es un experto en diseño digital y 2) obtener un buen rendimiento del sistema control [10]. Las etapas mencionadas se describen a continuación:

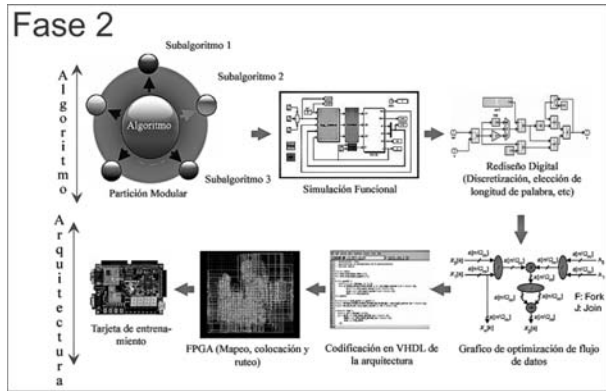


Figura 3. Fase 2 de la metodología. [10]

1. **Partición modular:** Consiste en dividir el algoritmo en bloques reutilizables que tienen sentido desde un punto de vista funcional, es decir, el algoritmo de control y el modulador del inversor se dividen en módulos y se identifican aquellos que puedan ser reutilizables como operaciones, codificadores, tablas de búsqueda, etc. Se trata de dividir el diseño en partes más pequeñas que puedan ser manejables.
2. **Simulación funcional:** En esta etapa el controlador se valida en función de bloques en tiempo continuo empleando por ejemplo el *software* MATLAB-Simulink.
3. **Rediseño digital:** Esta etapa es muy importante, ya que se incluye la realización del filtro digital, la elección del periodo de muestreo, la elección del formato de coeficientes y variables acorde con las necesidades y restricciones del control tales como: longitud de palabra, punto fijo o punto flotante, entre otros.

Las cuatro etapas finales son para la implementación basada en FPGA y consisten en lo siguiente:

4. **Gráfico de optimización del flujo de datos:** En esta etapa se modela el flujo de datos del algoritmo para tener el mejor balance en términos de tiempo/área, para esto se obtiene una representación gráfica de cada módulo del algoritmo. La representación gráfica está compuesta de líneas y nodos, cada línea corresponde a una transferencia de datos y los nodos representan operaciones aritméticas o funciones lógicas o matemáticas.
5. **Codificación HDL:** A partir del gráfico de flujo de datos de la etapa anterior se transcribe a código VHDL; las transferencias de datos por lo regular son controladas por máquinas de estados finitos síncronas a la señal de reloj del FPGA.
6. **Implementación en FPGA:** Este es un proceso automático y es realizado por lo regular con la herramienta que proporciona el fabricante del dispositivo, en esta etapa se realiza el mapeo de las funciones resultantes, colocación y ruteo.
7. **Validación experimental:** Consiste en integrar todo el sistema, se realizan pruebas de rendimiento, y se ajustan los parámetros necesarios hasta obtener los resultados deseados.

4. Fase 1 de la metodología

4.1. Control por ETEDPOF, modelado y análisis

Partiendo del modelo $d-q$ obtenido de las ecuaciones del modelo matemático original obtenido en [15], se calculan los voltajes de entrada $u = [u_d u_q]$ y las corrientes de entrada $i = [i_d i_q]$ en el eje coordenado $d-q$. Para el diseño del controlador se supone que se conoce la velocidad angular y el par de carga. Para comenzar con el diseño del controlador por retroalimentación de la salida pasiva, se considera el siguiente modelo en el eje coordenado $d-q$ [3]:

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= -r_e i_d + L i_q n_p \omega + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} &= -r_e i_q + L i_d n_p \omega - K_m \omega + u_q \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3}{2} K_m i_q - D \omega - T_L \end{aligned} \quad (1)$$

Representando el sistema de ecuaciones (1) en su forma matricial y reescribiéndolo en su forma pasiva, se tiene lo siguiente [16]:

$$\begin{aligned} A\dot{x} &= [J(y) - R]x + Bu - N\eta, x \in R^3, u \in R^2 \\ y_1 &= i_d \\ y_2 &= i_q \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$$A = \text{diag} \left(L \quad L \quad \frac{2}{3}J \right); N = \text{diag} \left(1 \quad 1 \quad 1 \right) \quad (3)$$

$$J(y) = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_m \\ 0 & k_m & 0 \end{pmatrix}}_{=J_0} + y \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & n_p L & 0 \\ -n_p L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{=yJ_1} \quad (4)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_e & 0 & 0 \\ 0 & r_e & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}B \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \eta = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2}{3}T_L \end{pmatrix} \quad (5)$$

El vector de estados está compuesto por:

$$x^T(t) = (i_d, i_q, \omega) \quad (6)$$

J_0 y J_1 son matrices constantes y antisimétricas, y es un escalar que representa la salida del sistema y, además, es una de las variables del vector de estado x ; R es una matriz simétrica semidefinida positiva, B es una matriz constante de las entradas de control y finalmente η es un vector de pares de carga. Para comprobar que el sistema promedio no lineal del MSIP dado en (1) es pasivo, se hace uso de las definiciones de pasividad y disipatividad tratadas en [3].

Sea $u^* \in \mathbb{R}^2$ la cual denota la trayectoria de entrada nominal correspondiente a la trayectoria del vector de estado nominal $x^*(t) \in \mathbb{R}^3$. Partiendo de ello se construye la dinámica de referencia del sistema, la cual debe satisfacer la siguiente expresión:

$$A\dot{x}^* = [J(y^*) - R]x^* + Bu^* - N\eta^* \quad (7)$$

Se define el error de seguimiento $e = x - x^*$, el error de la entrada de control $e_u = u - u^*$, y el error de la entrada de la perturbación $e_\eta = \eta - \eta^*$ y tomando en cuenta que $J(y) = J_0 + yJ_1$, entonces:

$$A\dot{e} = J(y)e - Re + Be_u + J_1x^*l_3e - Ne_\eta$$

Definiendo a $M_3 = J_1x^*l_3$ como una matriz de 3×3 , dada por:

$$\begin{aligned} M_3 &= \begin{pmatrix} 0 & n_p L & 0 \\ -n_p L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= n_p L \begin{pmatrix} 0 & 0 & i_d^* \\ 0 & 0 & -i_q^* \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Después la matriz M_3 se descompone en dos matrices mediante la utilización del álgebra de matrices, y así, se consigue una matriz simétrica y una matriz antisimétrica, teniendo como resultado:

$$M_3 = \frac{1}{2}n_p L \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & i_d^* \\ 0 & 0 & i_q^* \\ -i_d^* & i_q^* & 0 \end{pmatrix}}_{W_3} + \frac{1}{2}n_p L \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & i_d^* \\ 0 & 0 & i_q^* \\ -i_d^* & i_q^* & 0 \end{pmatrix}}_{S_3}$$

Posteriormente W_3 se suma a la matriz conservativa $J(y)$, y S_3 se suma a la parte disipativa R . Con esta operación se consigue la ecuación de la dinámica del error de seguimiento, expresada como:

$$A\dot{e} = J^*e - R^*e + Be_u \quad (8)$$

Si se considera a $R^* > 0$, es decir, definida positiva entonces se satisface la siguiente condición:

$$R^* = \begin{pmatrix} r_e & 0 & -\frac{1}{2}n_p Li_q^* \\ 0 & r_e & \frac{1}{2}n_p Li_d^* \\ -\frac{1}{2}n_p Li_q^* & \frac{1}{2}n_p Li_d^* & \frac{2}{3}B \end{pmatrix} \quad (9)$$

Haciendo uso del criterio del Sylvester, se verifica que $R^* > 0$, es decir, que es una matriz semidefinida positiva, por tanto, se debe cumplir que:

$$\det(R^*) = \frac{2}{3}r_e B - \frac{1}{4}n_p^2 L^2 [(i_d^*)^2 + (i_q^*)^2] > 0 \quad (10)$$

Siguiendo con la metodología de diseño del controlador, mediante Lyapunov, se propone a e_u como $e_u = -\delta B^T e$, donde:

$$\begin{aligned} \delta &= \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix} > 2 \\ \delta_1, \delta_2 &> 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Siendo δ una matriz definida positiva, tal que:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} x^* \quad (12)$$

De la Ecuación (12) obtenemos las leyes de control que actuarán sobre el sistema, quedando de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u_d &= \widetilde{u}_d - \delta_1(i_d - \widetilde{i}_d) \\ u_q &= \widetilde{u}_q - \delta_2(i_q - \widetilde{i}_q) \end{aligned} \quad (13)$$

4.1.1. Puntos de equilibrio

Los puntos de equilibrio nos servirán para calcular las variables de referencia deseadas i_d^* , i_q^* , u_d^* , u_q^* , w^* . Para este caso w^* es el valor de la velocidad deseada que se medirá en la flecha del motor. Para obtener estas referencias se toma el conjunto de las ecuaciones (1) y se igualan las derivadas a 0, por tanto, se obtienen las siguientes expresiones:

$$0 = L\tilde{i}_q n_p \omega_d + u_d \quad (14)$$

$$0 = -r_e \tilde{i}_q - K_m \omega_d + u_q \quad (15)$$

$$0 = \frac{3}{2} K_m \tilde{i}_q - D \omega_d - T_L \quad (16)$$

Despejando se obtiene:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d &= 0 \\ \tilde{i}_q &= \frac{2}{3} \frac{D}{K_m} \omega_d + \frac{2}{3} \frac{T_L}{K_m} \\ \tilde{u}_d &= -L\tilde{i}_q n_p \omega_d \\ \tilde{u}_q &= r_e \tilde{i}_q + K_m \omega_d \end{aligned} \quad (17)$$

4.1.2. Diseño del observador del parámetro del par de carga

Para diseñar y desarrollar un controlador eficiente y robusto, es necesario conocer todas las variables que perturban al sistema. Debido a que el controlador por retroalimentación de la salida pasiva del error, no es robusto ante perturbaciones de par de carga constante, se diseña un observador de orden reducido para estimar el parámetro de par de carga junto con los términos de fricción no modelados [17]. Se define la corriente de cuadratura i_q como la entrada de control, $u_1 = i_q$ y se define a la velocidad angular estimada como la salida medida, $y_1 = \omega$. Los valores nominales de los parámetros, J y K_m se consideran conocidos. Sustituyendo las variables u_1 y y_1 en la ecuación mecánica dada en (1), se obtiene la siguiente expresión:

$$J \frac{dy_1}{dt} = \frac{3}{2} k_m u_1 - B y_1 - T_L \quad (18)$$

Se propone el siguiente observador de par de carga como:

$$\frac{d\tilde{T}_L}{dt} = \lambda(T_L - \tilde{T}_L) \quad (19)$$

Donde $\lambda > 0$. La dinámica del error de estimación está dada por:

$$e_{T_L} = T_L - \tilde{T}_L \quad (20)$$

$$\frac{de_{T_L}}{dt} = \frac{dT_L}{dt} - \frac{d\tilde{T}_L}{dt} \quad (21)$$

Considerando T_L constante se tiene $\frac{dT_L}{dt} = 0$, sustituyendo (19) en (21), se obtiene la siguiente dinámica del error de estimación:

$$\frac{de_{T_L}}{dt} = -\lambda e_{T_L} \quad (22)$$

Escogiendo una ganancia $\lambda > 0$, el error de observación e_{T_L} , converge a cero exponencialmente cuando $t \rightarrow \infty$. Ahora, sustituyendo la Ecuación (18) en (19), se tiene que:

$$\frac{d\tilde{T}_L}{dt} = \lambda \left[\frac{3}{2} K_m i_q - \left(B y_1 + J \frac{dy_1}{dt} \right) \tilde{T}_L \right] \quad (23)$$

Despejando y reordenando la ecuación anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d\tilde{T}_L}{dt} + \lambda J \frac{dy_1}{dt} = \frac{3}{2} K_m u_1 - \lambda B y_1 - \lambda \tilde{T}_L \quad (24)$$

Realizando el cambio de variable $\Psi = \tilde{T}_L + \lambda J y_1$, se obtiene el siguiente observador de orden reducido:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\lambda \Psi + (J\lambda - B)\lambda y_1 + \frac{3}{2} \lambda K_m i_q \quad (25)$$

$$\tilde{T}_L = \Psi - \lambda J y_1 \quad (26)$$

El valor estimado del parámetro de par de carga junto con los términos de fricción desconocidos \tilde{T}_L , se adaptan en línea a la ley de control de seguimiento suave de velocidad angular. El propósito de esta adaptación es disminuir los efectos producidos por la carga aplicada al eje del MSIP.

4.2. Simulaciones en MATLAB del controlador

Con el uso del *software* MATLAB-Simulink se procede a hacer el diseño en diagrama de bloques de todo el sistema. En la Figura 4 se muestra el diagrama a bloques principal.

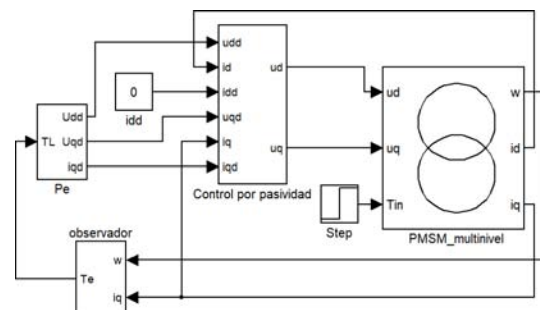


Figura 4. Diagrama a bloques principal.

El controlador por pasividad mostrado en la Figura 4 está basado en el conjunto de ecuaciones (12), la implementación en bloques se muestra en la Figura 5.

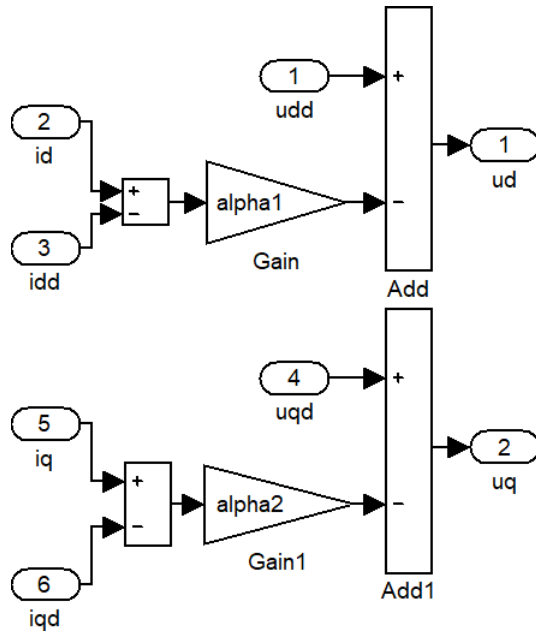


Figura 5. Controlador basado en pasividad.

El observador de carga de las ecuaciones (25) y (26) se muestra en bloques en la Figura 6.

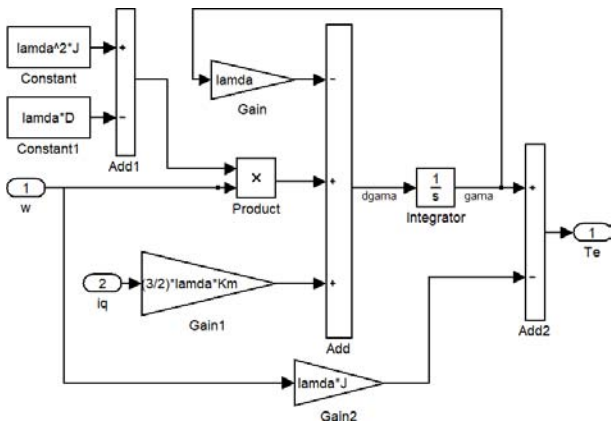


Figura 6. Observador de carga de orden reducido.

Las ecuaciones (17) de los puntos de equilibrio del sistema, que se utilizan para encontrar las referencias y trayectorias deseadas se muestran a bloques en la Figura 7.

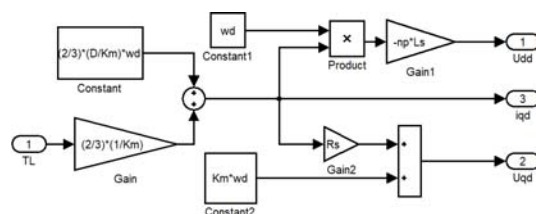


Figura 7. Señales de referencia.

Para validar el funcionamiento del sistema se realiza la cosimulación con Simulink y Psim. El diagrama eléctrico en Psim del inversor multinivel en conjunto con el motor MSIP se muestra en la Figura 8. Se puede observar que el inversor multinivel se compone de tres secciones iguales como la mostrada en el recuadro de la izquierda de la Figura 8.

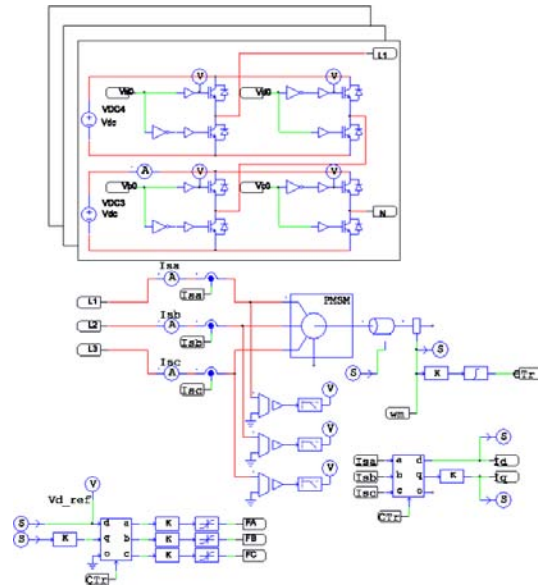


Figura 8. Diagrama eléctrico en Psim.

4.3. Inversor multinivel

Para este trabajo se utiliza un inversor multinivel de celdas en cascada. Esta configuración se basa en celdas conectadas en serie para sumar los voltajes y obtener los 5 niveles deseados como se muestra en la Figura 9.

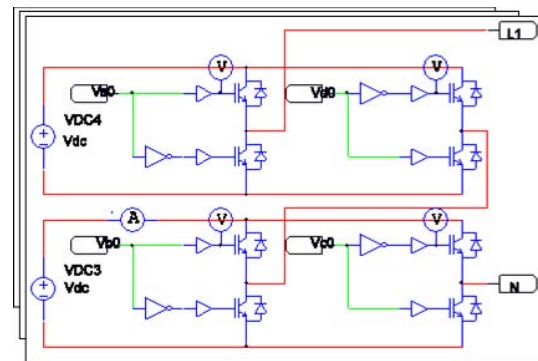


Figura 9. Topología del inversor en cascada de 5 niveles seleccionado.

La técnica de modulación empleada es PS-PWM, la cual consiste, para el caso de un inversor de 5 niveles, de cuatro señales triangulares llamadas portadoras, desfasadas entre sí 90°, es decir, 0°, 90°, 180° y 270°, respectivamente; para este caso las portadoras se generan a una frecuencia de 12 kHz. Estas señales se comparan

con una función sinusoidal llamada moduladora, para el caso en cuestión, dicha moduladora está generada por la transformación dq-abc. De manera general su funcionamiento consiste en obtener unos y ceros lógicos por medio de la comparación de la portadora y moduladora; si la señal portadora es mayor o igual a la moduladora, se obtiene un uno lógico, y en caso contrario se tiene un cero lógico. De esta manera, se generan las señales PWM que activan los dispositivos de conmutación. Cabe aclarar que cada fase contiene una moduladora desfasada 120° con respecto a las otras fases, por lo tanto se tiene un total de 24 señales PWM, 12 canales principales con sus 12 señales complementarias. En la Figura 10 se muestra el diagrama para generar la modulación PS-PWM solo para una fase con sus cuatro señales principales.

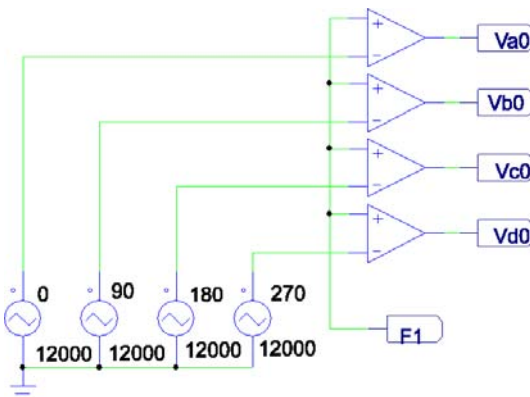


Figura 10. Modulador PS-PWM para una fase.

4.4. Resultados de simulación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la cosimulación del sistema ante diferentes escenarios y así mostrar una comparativa. Estos escenarios son: el modelo del MSIP de Psim accionado por un inversor trifásico convencional y finalmente accionado por el inversor trifásico multinivel de cinco niveles. En ambos casos es aplicado el controlador por pasividad diseñado. Como resultado de la simulación, en la gráfica de la Figura 11 se puede apreciar la velocidad angular del motor accionado ambos tipos de inversor. En dicha gráfica puede observarse que cuando se aplica un cambio en el par de carga en la flecha del motor, en el tiempo $t = 1s$, la perturbación provocada por dicho cambio es efectivamente contrarrestada por el controlador. No existe una diferencia apreciable entre un tipo de inversor y otro.

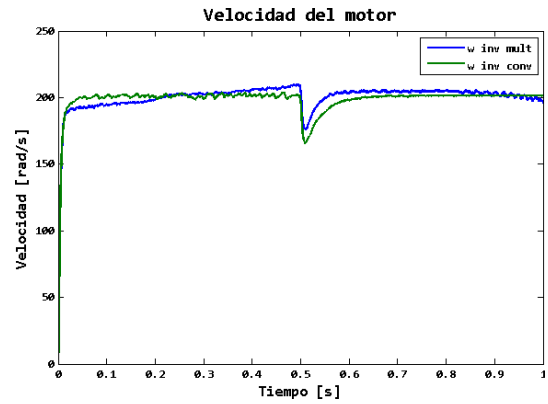


Figura 11. Velocidad del motor.

En la Figura 12 y 13 se muestran las gráficas de las corrientes i_d , i_q respectivamente en las condiciones ya mencionadas. Es importante hacer notar que con el uso de un inversor multinivel el rizo en las corrientes disminuye de manera considerable por el uso combinado de dicho inversor y el controlador diseñado.

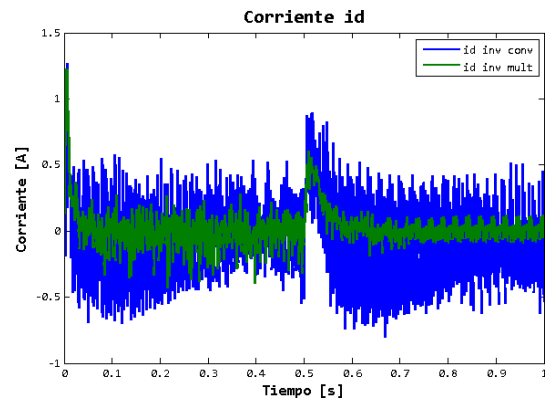


Figura 12. Corriente i_d .

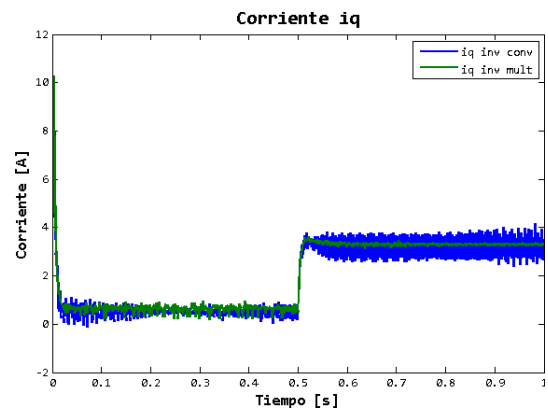


Figura 13. Corriente i_q .

Finalmente, en la Figura 14 se muestra la estimación del par de carga. Se puede apreciar que en el observador diseñado igualmente funciona mejor en el caso del inversor multinivel, lo que comprueba su funcionamiento correcto.

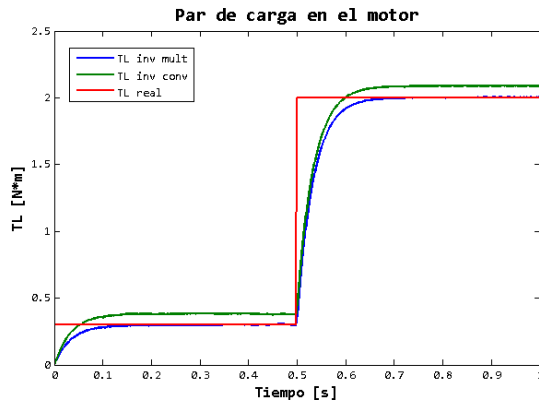


Figura 14. Par de carga del motor estimado.

5. Fase 2

En esta fase se realiza la programación del FPGA. Cabe mencionar que en este trabajo la codificación se realiza directamente en el lenguaje VHDL, sin emplear ningún generador de código, este enfoque permite hacer uso óptimo de los recursos del dispositivo.

5.1. Implementación del módulo del modulador PSPWM

El modulador fue programado en el *software* ISE DESIGN de XILINX en lenguaje VHDL, por simplicidad en la Figura 15 se muestra el diseño por medio de un diagrama esquemático a bloques. Los bloques programados principales son: bloque de portadoras que es donde se generan las señales triangulares; el bloque de moduladora, es el que genera la señal moduladora; finalmente, los comparadores generan las señales PWM para realizar la comparación de las portadoras con la moduladora.

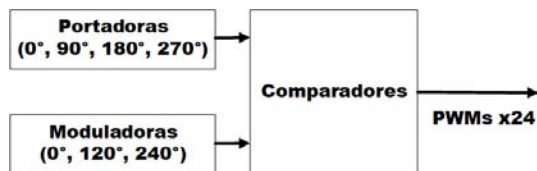


Figura 15. Diagrama a bloques del modulador.

5.2. Implementación del módulo del controlador

El controlador está dividido en varios submódulos: transformación abc-dq, transformación dq-abc, observador de carga, puntos de equilibrio, control de velocidad basado en pasividad, lectura de los sensores de corriente, lectura del sensor de posición/ velocidad. Estos módulos trabajan con el estándar IEEE 754 de 32 bits de precisión simple que es el formato numérico más utilizado en *hardware* [18].

5.2.1. Módulo transformado dq - abc

Para el desarrollo de este módulo se realiza la arquitectura mostrada en la Figura 16, la cual es de ayuda para la solución en línea de la Ecuación (27) y la optimización de recursos. En el caso de este módulo se utiliza un multiplicador, un sumador y un registro, todos estos elementos se encuentran dentro del FPGA, sin embargo, al ser limitados se debe de optimizar su uso. Como se observa en la Figura 16, este requiere 8 entradas: d, q y las 6 funciones trigonométricas. A la salida tenemos los valores a, b y c, los cuales representan el valor del voltaje de las fases. Posteriormente en la Figura 17 se muestra la implementación en el *hardware* de las ecuaciones (27), esta metodología fue tomada de [19]. Dado la complejidad del sistema para ejemplificar el desarrollo, solo se muestra este módulo, sin embargo, la construcción de los demás módulos del sistema se realiza de manera similar. En la Tabla 1 se muestra el consumo de recursos lógicos en el FPGA después de realizar la implementación de todos los módulos implicados en el diseño y en la Figura 18 se presenta el diagrama de más alta jerarquía del sistema.

$$\begin{aligned} V_a &= V_d \cos(\theta) + V_q \sin(\theta) \\ V_b &= V_d \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) + V_q \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ V_c &= V_d \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) + V_q \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (27)$$

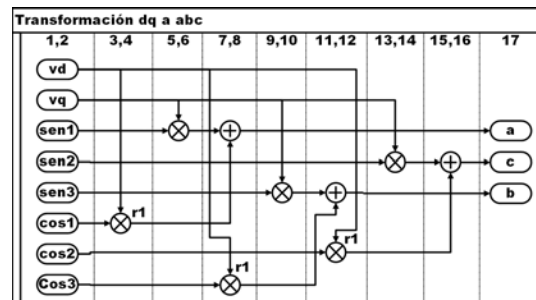


Figura 16. Diagrama de secuencia de la transformada dq a abc.

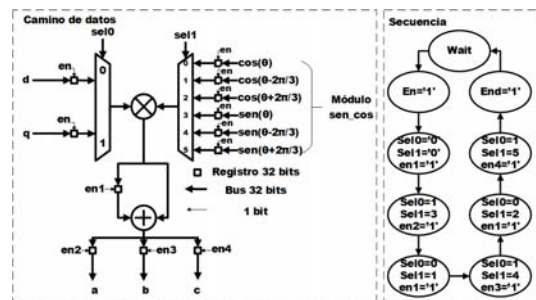


Figura 17. Diagrama de flujo de datos y máquina de estados.

Tabla 1. Nivel de utilización del FPGA

Device Utilization Summary			
Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Registers	4,038	11,440	35%
Number of Slice LUTs	4,834	5,720	84%
Number used as logic	4,599	5,720	80%
Number used as Memory	179	1,440	12%
Number of occupied Slices	1,408	1,430	98%
Number of MUXCYs used	1,716	2,860	60%
Number with an unused Flip Flop	1,808	5,107	35%
Number with an unused LUT	273	5,107	5%
Number of fully used LUT-FF pairs	3,026	5,107	59%
Number of unique control sets	84		
Number of slice register sites lost to control set restrictions	245	11,440	2%
Number of bonded IOBs	56	186	30%
Number of LOCed IOBs	55	56	98%
Number of RAMB16BWERs	17	32	53%
Number of RAMB8BWERs	10	64	15%
Number of BUFIO2/BUFIO2_2CLKs	1	32	3%
Number of BUFIO2FB/BUFIO2FB_2CLKs	1	32	3%
Number of BUFG/BUFGMUXs	5	16	31%
Number of DCM/DCM_CLKGENs	1	4	25%
Number of DSP48A1s	16	16	100%
Average Fanout of Non-Clock Nets	3.65		

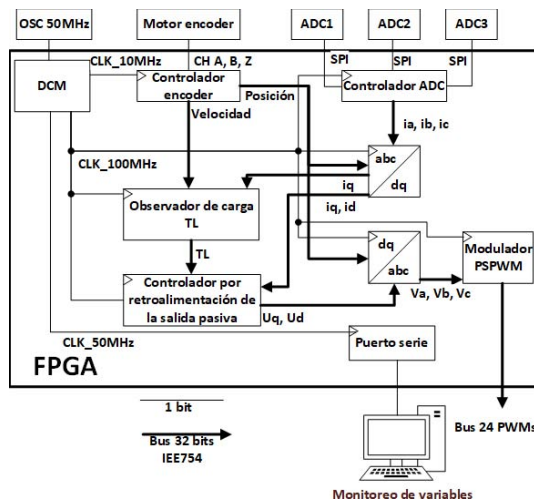


Figura 18. Diagrama esquemático general del sistema en el FPGA.

6. Plataforma experimental

La configuración eléctrica de la plataforma del inversor multinivel se muestra por medio del diagrama unifilar mostrado en la Figura 19.

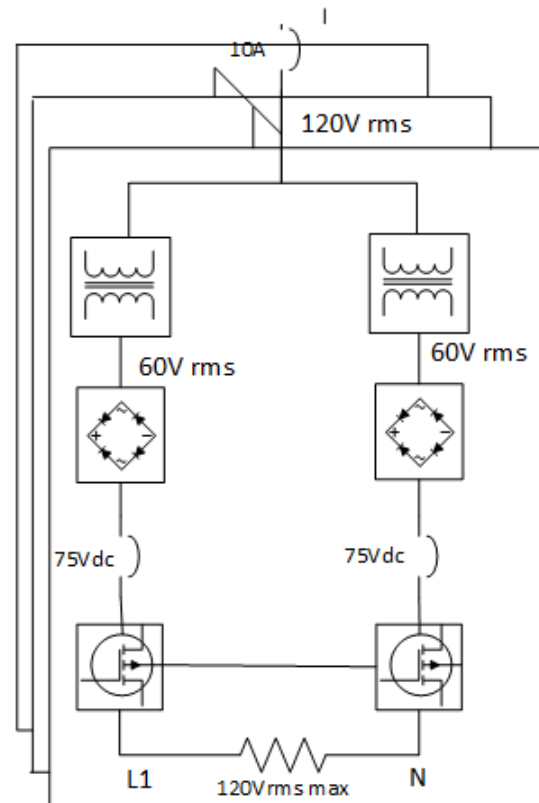


Figura 19. Diagrama unifilar del inversor multinivel.

En la Figura 20 se muestra la plataforma experimental construida y empleada para las pruebas de laboratorio. Las señales de control son generadas por el FPGA, que sirven para conmutar el inversor multinivel y generar la potencia necesaria para impulsar al MSIP de acuerdo con la trayectoria de referencia deseada. La plataforma experimental está conformada por los siguientes elementos:

- Fuentes de CD aisladas
- Puentes-H
- Centro de carga principal
- Fuentes de CD aisladas
- Transformador de la fuente de CD
- Puente de diodos
- Capacitores de la fuente de CD
- Riel Din
- Clemas de conexión
- Interruptores de protección

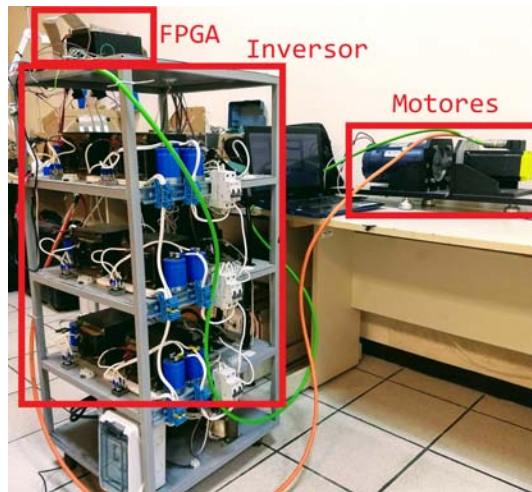


Figura 20. Plataforma experimental.

6.1. Kit de desarrollo ALINX

El kit de desarrollo utilizado es de la marca ALINX modelo AX309 mostrado en la Figura 21, este cuenta con un FPGA SPARTAN-6 XC6SLX9, el cual es una plataforma de desarrollo de bajo costo, con las siguientes características:



Figura 21. Kit de desarrollo.

- FPGA model: XC6SLX9
- Tamaño 90x130 mm
- Crystal oscillator: 50 MHz
- Número de E/S de expansión: 68
- SDRAM: 256 Mbit
- FLASH: 16 Mbit
- IO port level: 3.3 V
- Serial port: onboard U transfer serial port

6.2. Motor síncrono de imanes permanentes

El motor utilizado es de la marca BALDOR cuyas características principales son de 1.23 kW a 4000 rpm, en la Figura 22 se muestra el motor y sus parámetros en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del motor

Parámetro	Valor
CAT.NO.	BSM80N-275AF
SPEC.	S2P141W042G1
TORQ CONT STALL	3.2 NM
CUR CONT STALL/A RMS	4
POWER	1.23KW
RATED SPEED/RPM	4000
RATED BUS VOLTS	300
PEAK CUR/A RMS	14.4
MAX SPEED/RPM	7000
CLASS	F
AMB.	25



Figura 22. MSIP empleado (izquierda) y motor de CD usado como carga (derecha).

7. Resultados experimentales

Dado que el procesamiento al interior del dispositivo FPGA es numérico, es necesario contar con un medio para obtener la lectura de las diferentes señales que se procesan, para ello se toman lecturas de las señales y se envían por medio del puerto serial/UART a una velocidad de 921 600 bps, una vez que se reciben en la computadora son procesadas y se presentan por medio de una GUI diseñada en LabView, los parámetros medidos son la velocidad (ω), las corrientes i_q , i_d y el par de carga estimado (TL), cada gráfica tiene un total de 70 000 muestras en 5 segundos.

Por otra parte, el MSIP se encuentra acoplado en su flecha a un motor de corriente directa (CD) que funciona como carga mecánica externa como se puede ver en la Figura 22.

A continuación, en la Figura 23, se muestra la velocidad angular ω medida por medio del encoder del motor. La velocidad deseada ω_d se obtiene por medio del seguimiento de una curva obtenida partiendo de un

polinomio Bézier de 6.º orden, la cual es usada como referencia. La duración de la curva de arranque es de 5 s, después de ello se puede observar que la velocidad del motor logra establecerse en 200 rad/s como se desea. No obstante, es apreciable un rizo en la velocidad real el cual se debe principalmente al algoritmo de diferenciación numérica utilizado para obtener la velocidad a partir de las lecturas del encoder.

Durante el mismo periodo de tiempo en la Figura 24, se muestra el seguimiento de la corriente i_q al arranque del motor, estableciéndose en 0.5 amperes; esta es la corriente activa que es aprovechada por el motor y es transformada en par mecánico. De igual manera, en la Figura 25 se muestra la regulación de la corriente i_d , esta debe mantenerse en 0 amperes dado que es la corriente reactiva que no es posible aprovecharla. Ambas corrientes mostradas por igual muestran rizo el cual se debe a la resolución de los sensores de corriente empleados. Finalmente, en la Figura 26 se muestra la estimación del par de carga en el eje del motor durante el mismo periodo de tiempo, la cual al llegar a la velocidad deseada se establece en 0.4 Nm.

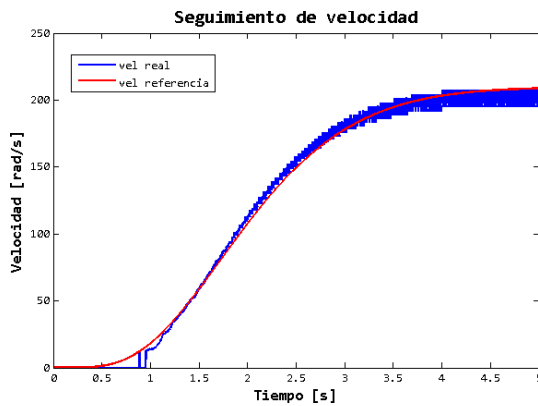


Figura 23. Seguimiento de velocidad suave al arranque.

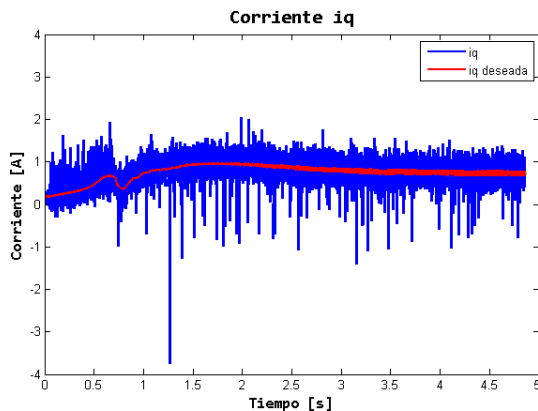


Figura 24. Seguimiento de la corriente i_q al arranque.

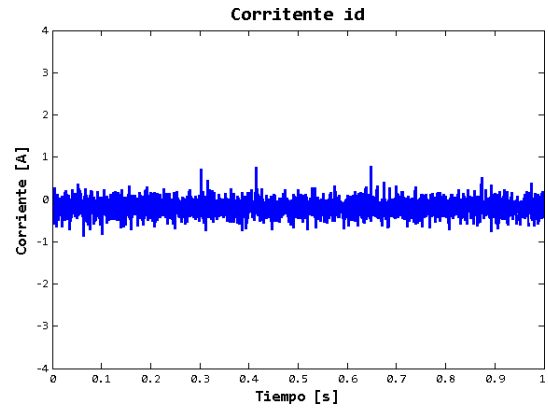


Figura 25. Seguimiento de la corriente i_d al arranque.

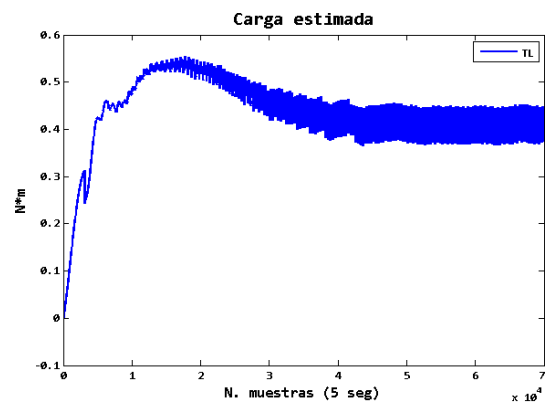


Figura 26. Carga estimada en la flecha del motor.

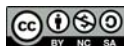
8. Conclusiones

Con base en los resultados de simulación y los resultados experimentales se puede argumentar que el controlador por retroalimentación de la salida pasiva diseñado e implementado lleva a cabo de manera adecuada el seguimiento y regulación de la velocidad angular del MSIP. Por otro lado, se verifica que el estimador de orden reducido del par de carga, estima correctamente este parámetro. De manera adicional, en términos de *hardware*, se observa que el inversor multinivel reduce considerablemente la distorsión armónica de voltaje, lo que se traduce en menor ruido en el sistema en general y evita la necesidad de utilizar filtros. Gracias a las particularidades del dispositivo digital (FPGA) donde se realizó la implementación, se logra un periodo de muestreo de 10 μ s, lo que redundará en el beneficio de tener mayor velocidad de respuesta ante cambios de carga repentinos.

Como trabajo futuro se pretende implementar un algoritmo más complejo, tal como un estimador algebraico, para lograr una mejor estimación del par de carga mecánico. Lo anterior sería posible aprovechando la característica principal del FPGA que es el paralelismo.

Referencias

- [1] T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/35aPtZm>
- [2] L. Blanco Rubio, “Diseño electromagnético de un motor síncrono de imanes permanentes para el accionamiento directo de la hélice de un barco,” 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PAJZAj>
- [3] J. Linares-Flores, C. García-Rodríguez, O. D. Ramírez-Cárdenas, C. Escobar-Noriega, and M. A. Contreras-Ordaz, “Control robusto de seguimiento suave de posición angular del motor síncrono de imanes permanentes,” in *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, Octubre 14-17, 2014. Cancún, Quintana Roo, México*, 2014, pp. 1113–1118. [Online]. Available: <http://doi.org/10.13140/2.1.2760.9607>
- [4] J. Linares-Flores, C. Garcia-Rodriguez, H. Sira-Ramirez, and O. D. Ramirez-Cárdenas, “Robust backstepping tracking controller for low speed pmsm positioning system: Design, analysis, and implementation,” in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, March 2015, pp. 2131–2138. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125411>
- [5] IEEE, “Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems,” *IEEE Std 519-1992*, pp. 1–112, April 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1993.114370>
- [6] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/2t9mZ42>
- [7] J. A. Juárez-Abad, J. Linares-Flores, E. Guzmán-Ramírez, and H. Sira-Ramírez, “Generalized proportional integral tracking controller for a single-phase multilevel cascade inverter: An fpga implementation,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 256–266, Feb 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2242085>
- [8] F. Chauca Llusca, F. Llerena Rengel, and P. Chico Hidalgo, “Diseño y construcción de un inversor multinivel,” *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/36rAxpI>
- [9] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. M. Prats, “The age of multilevel converters arrives,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, June 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.923519>
- [10] E. Monmasson, L. Idkhajine, and M. W. Naouar, “Fpga-based controllers,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 14–26, March 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MIE.2011.940250>
- [11] D. G. Maxinez and J. Alcalá Jara, *VHDL: el arte de programar sistemas digitales*, 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PCE8dL>
- [12] J. J. Rodríguez-Andina, M. D. Valdés-Peña, and M. J. Moure, “Advanced features and industrial applications of FPGAs—a review,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 4, pp. 853–864, Aug 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2431223>
- [13] W. Zhu, “Fpga logic devices for precision control: An application to large friction actuators with payloads,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 34, no. 3, pp. 54–75, June 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2308691>
- [14] E. Mandado, L. J. Álvarez, and M. D. Valdés, *Dispositivos Lógicos Programables*, 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/38uCiEq>
- [15] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, 2017.
- [16] H. J. Marquez, *Nonlinear control systems: analysis and design*. Wiley-Interscience Hoboken, 2003, vol. 1. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YMdMKM>
- [17] Y. E. Gliklikh, “Necessary and sufficient conditions for global-in-time existence of solutions of ordinary, stochastic, and parabolic differential equations,” *Abstract and Applied Analysis*, vol. 2006, Special Issue, p. 17, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/AAA/2006/39786>
- [18] IEEE, *IEEE 754-2019 - IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic*, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2E5tnvo>
- [19] M. Naouar, E. Monmasson, A. A. Naasani, I. Slama-Belkhodja, and N. Patin, “FPGA-based current controllers for AC machine drives—a review,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 1907–1925, Aug 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.898302>



FILTRAJE ROBUSTO DE SEÑALES DÉBILES DE FENÓMENOS REALES

ROBUST FILTERING OF WEAK SIGNALS FROM REAL PHENOMENA

Valeri Kontorovich^{1,*}, Fernando Ramos-Alarcón¹

Resumen

En un gran número de escenarios de la vida real se requiere procesar señales de interés que se encuentran muy inmersas en medio de ruido de fondo: señales tectónicas de las entrañas de la Tierra, otras provenientes del lejano cosmos, de telemetría biomédica, acústicas lejanas, interfaces neuronales no invasivas, etc. El propósito de este trabajo es presentar la descripción de una plataforma robusta y eficiente para hacer filtraje en tiempo real de señales muy inmersas en ruido (bastante débiles) y de naturaleza muy diferente. La estrategia propuesta se basa en dos principios: el modelado de las señales de los fenómenos físicos mediante procesos caóticos y la aplicación de estrategias de filtraje basadas en la teoría de sistemas dinámicos no lineales. Tomando como caso de estudio señales sísmicas, señales de electrocardiogramas fetales, señales de tipo voz y señales de interferencias de radiofrecuencia, este trabajo experimental muestra que la metodología es eficiente (error cuadrático medio menor al 1 %) y robusta (la estructura de filtraje, basada en filtro de Kalman, es invariante ante diferentes señales fenomenológicas). La metodología presentada resulta ser muy atractiva para aplicaciones prácticas para la detección de señales débiles en tiempo real por su alta precisión de filtraje con una mínima complejidad computacional y tiempos de procesamiento muy cortos.

Palabras clave: caos, filtraje no lineal, sistemas dinámicos, filtro de Kalman, señales débiles, señales reales.

Abstract

In a large number of real-life scenarios it is required to process desired signals that are significantly immersed into background noise: tectonic signals from the entrails of the earth, signals coming from the far away cosmos, biometric telemetry signals, distant acoustic signals, noninvasive neural interfaces and so on. The purpose of this paper is to present the description of a robust and efficient platform for the real time filtering of signals deeply immersed in noise (rather weak signals) with rather different nature. The proposed strategy is based on two principles: the chaotic modelling of the signals describing the physical phenomena and the application of filtering strategies based on the theory of non-linear dynamical systems. Considering as a study case seismic signals, fetal electrocardiogram signals, voice-like signals and radio frequency interference signals, this experimental work shows that the proposed methodology is efficient (with mean squared error values less than 1%) and robust (the filtering structure remains the same although the phenomenological signals are drastically different). It turns out that the presented methodology is very attractive for the real time detection of weak signals in practical applications because it offers a high filtering precision with a minimum computational complexity and short processing times.

Keywords: Chaos, Non-Linear Filtering, Dynamic Systems, Kalman Filter, Weak signals, Real Signals.

^{1,*} Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Comunicaciones, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), México. Autor para correspondencia ✉: valeri@cinvestav.mx
<http://orcid.org/0000-0002-1307-3001>, <http://orcid.org/0000-0002-8235-4886>

Recibido: 11-09-2019, aprobado tras revisión: 11-12-2019

Forma sugerida de citación: Kontorovich, V. y Ramos-Alarcón, F. (2020). «Filtraje robusto de señales débiles de fenómenos reales». INGENIUS. N.º 23, (enero-junio). pp. 109-119. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.10>.

1. Introducción

El procesamiento de señales es básico para muchas áreas de ciencia e ingeniería. Una de las etapas fundamentales para cualquier algoritmo de procesamiento de señales es el filtraje, es decir, eliminar (filtrar) el ruido de fondo que acompaña a la señal bajo estudio antes del correspondiente procesamiento de señales.

Para contrarrestar los efectos del ruido existen diversas estrategias de filtraje de señales. Las metodologías convencionales de filtraje (basadas en procesamiento estadístico) resultan bastante efectivas cuando la relación señal a ruido (SNR) es mayor o igual a uno, $SNR \geq 1$, o bien $SNR \geq 0$ dB si se expresa en decibeles (es decir, magnitud del ruido menor o igual a la magnitud de la señal de interés).

En muchas aplicaciones prácticas se procesan señales con ruido cuando la magnitud de este último es mayor que la magnitud de la señal de interés, $SNR < 1$. Para el filtraje de señales en estas situaciones las estrategias convencionales han sido adaptadas o bien se han creado metodologías novedosas (basadas en procesamientos iterativos, wavelets, etc.). El costo de lograr el filtraje de señales en estas condiciones es que el procesamiento en tiempo real se ve ligeramente afectado.

El proceso de filtraje es un gran desafío cuando se requiere la detección de señales muy débiles (magnitud del ruido mucho mayor que la magnitud de la señal deseada, es decir, $SNR \ll 1$ o bien $SNR \ll 0$ dB), por ejemplo, señales de sistemas solares lejanos, actividad cardíaca fetal, pequeños sismos precursores de terremotos, señales de voz inmersas en ruido de fondo, señales de información de radiofrecuencia, interfaces neuronales no invasivas, etc. El tema de detección de señales débiles no es realmente nuevo y es posible encontrar una gran cantidad de publicaciones (ver [1–6] solo por citar algunas referencias) que abordan este tema con diversas metodologías y para diferentes fenómenos. Se emplean técnicas que van desde diferentes esquemas de filtraje (adaptivo, tiempo-frecuencia, FIR, IIR, etc.), lógica difusa (fuzzy logic), sistemas caóticos, resonancia estocástica, hasta diferentes estrategias de descomposición (modo empírico, wavelets, señales ortogonales, etc.). Lo novedoso para el caso del presente trabajo es la aplicación de señales caóticas como modelos de los fenómenos reales basándose en la teoría de sistemas dinámicos determinísticos, no lineales.

Con una historia de más de 50 años, la teoría de sistemas dinámicos [7–9] es uno de los pilares de muchas áreas científicas, como física, control automático, comunicaciones, etc.; particularmente es muy relevante para el filtraje mediante el célebre filtro de Kalman (propuesto por Rudolph E. Kalman en 1960), el cual permite un filtraje muy preciso considerando que la señal deseada es un sistema dinámico lineal bajo la influencia de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN)

y desde su invención hasta la fecha cuenta con un sinnúmero de aplicaciones prácticas recientes y añejas (por ejemplo, [10, 11]).

El filtro extendido de Kalman (EKF) permite aplicar la misma metodología para el caso de sistemas dinámicos no lineales, gracias a que en cada ciclo de operación se lleva a cabo un proceso de linealización (cálculo jacobiano de las correspondientes ecuaciones no lineales) tomando como referencia el punto corriente (muestra actual) de operación.

¿Cómo lograr, a partir de la teoría de sistemas dinámicos no lineales, una estrategia efectiva de filtraje para señales débiles de fenómenos físicos diametralmente diferentes? Una de las opciones que se explora en este trabajo es el modelaje de las señales fenomenológicas como señales generadas por atractores caóticos, i. e. por sistemas dinámicos no lineales, pero deterministas. En este caso la aplicación del concepto de sistemas dinámicos permite dos cosas muy útiles: modelar las señales reales como procesos formalmente determinísticos y aplicar todos los resultados de filtraje basados en la teoría de sistemas dinámicos.

Usar modelos caóticos para señales reales resulta original y bastante eficaz, como se muestra más adelante, a pesar de que como tal el modelaje de fenómenos reales por medio de señales caóticas se ha usado durante más de 50 años en áreas tales como simología [1, 2, 12], teoría estadística de las comunicaciones [13, 14], telemetría biomédica [15, 16], procesamiento de señales submarinas [3], y también en muchas áreas relacionadas a física aplicada [17].

En este trabajo se presenta un filtraje efectivo (cuyos aspectos teóricos se desarrollaron en [18, 19]) en el sentido de una alta precisión en términos de valores muy pequeños del error cuadrático medio normalizado (NMSE $< 1\%$). La normalización del error cuadrático medio (MSE) se considera en relación con la varianza de la señal fenomenológica. Por otro lado, el filtraje es también robusto en el sentido de que, para señales de entrada provenientes de diferentes fenómenos físicos, tanto la estructura del filtro como su precisión (valores del NMSE) son prácticamente invariantes.

El modelaje caótico es muy útil porque casi todos los algoritmos de filtraje cuasióptimo se caracterizan por tener una alta precisión (valor muy bajo del NMSE) y una complejidad computacional muy baja. Los detalles teóricos y las demostraciones de estas propiedades se desarrollaron en [18, 19] donde el lector interesado puede revisarlos. En este trabajo se aplican y se extienden al terreno práctico las ideas del filtraje no lineal (publicadas en [19]), presentando solo los detalles experimentales de escenarios físicos con diferentes fenomenologías, en concreto señales sísmicas, señales cardíacas (ECG), señales del tracto vocal y señales interferentes de radiofrecuencia (RFI).

2. Materiales y métodos

El desarrollo de este trabajo se centra en dos elementos básicos. Por un lado, métodos desarrollados previamente que dan el sustento teórico riguroso y, por otro lado, programación de código en MatLab para crear un banco de pruebas. El código MatLab se desarrolla a partir de las ecuaciones de filtraje descritas más adelante. En el aspecto teórico, se emplean señales caóticas tanto para el filtraje de sistemas dinámicos no lineales como para modelar señales fenomenológicas. Dado que la idea es obtener algoritmos que puedan ser implementados en una plataforma de cómputo, es importante establecer la complejidad del filtraje dinámico no lineal en términos de operaciones o cálculos computacionales.

2.1. Filtraje y modelaje caótico

Un proceso caótico se define a partir un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias y sus correspondientes parámetros, es decir, es un proceso determinista [17]. En el espacio de fase un proceso caótico conforma una trayectoria orbital con la peculiar característica de que ninguna de todas las posibles trayectorias pasa dos veces por exactamente el mismo lugar [17]. Adicionalmente, un proceso caótico es sensible a cambios en las condiciones iniciales, es decir, dos realizaciones de un mismo proceso caótico cuyas condiciones iniciales difieren en un valor arbitrariamente pequeño son completamente decorrelacionadas en el mediano y largo plazo [17].

A pesar de ser determinista, un proceso caótico genera realizaciones de procesos, que se describen como estocásticos y es justamente la naturaleza determinista-estocástica la que explotamos para generar estrategias de filtraje (con ecuaciones deterministas) y modelar procesos físicos (con realizaciones estocásticas).

Un proceso caótico vectorial $\mathbf{x}(t)$ puede ser generado mediante la siguiente ecuación diferencial ordinaria, ODE:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

con condición inicial $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$; $\mathbf{F}(\cdot)$ es una función vectorial variante en tiempo (representa las ecuaciones caóticas). En nuestro caso consideraremos $\mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$ tomando como ejemplo las ecuaciones de los atractores caóticos de Rossler, Lorenz y Chua:

Rossler

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + T_s(-y_k - z_k) \\ y_{k+1} &= y_k + T_s(x_k - 0.2y_k) \\ z_{k+1} &= z_k + T_s(0.2 - z_k(5.7 - x_k)) \end{aligned} \quad (2)$$

Lorenz

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + T_s(10(x_k - y_k)) \\ y_{k+1} &= y_k + T_s(28x_k - y_k + x_k \cdot z_k) \\ z_{k+1} &= z_k + T_s(-\frac{8}{3}z_k + x_k \cdot y_k) \end{aligned} \quad (3)$$

Chua

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_{k+1} + T_s[9.205(y_k - U(x_k))] \\ y_{k+1} &= y_{k+1} + T_s[x_k - y_k + z_3] \\ z_{k+1} &= z_{k+1} + T_s[-14.3y_k] \end{aligned} \quad (4)$$

donde $U(x_k) = m_1 x_k + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)[|x_k + 1| - |x_k - 1|]$, $m_0 = -\frac{1}{7}$, $m_1 = \frac{2}{7}$ y T_s es el tiempo de muestreo. El algoritmo de filtraje que se usa (descrito un poco más adelante) es el filtro de Kalman discreto, por eso (2)-(4) se introducen en forma discreta.

En el bloque de filtraje se desconoce las condiciones iniciales de la señal bajo procesamiento, lo cual produce efectos de incertidumbre (divergencia) que pueden ser mitigados al incluir un «ruido de proceso» aditivo en la Ecuación (1). Así, se transforma la ODE en una ecuación diferencial estocástica, SDE que da origen a un proceso n-dimensional estocástico Markoviano:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \varepsilon \xi(t) \quad (5)$$

donde $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$ es análoga a $\mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$ en (1). La influencia de una fuente externa débil de ruido blanco se denota mediante $\xi(t)$; las intensidades del ruido se dan en forma de matriz $\varepsilon = [\varepsilon_{ij}]^{n \times n}$.

Al usar la SDE (5) como un modelo para el caos, la primera estrategia que viene inmediatamente a la mente es el filtraje no lineal de señales caóticas desarrollado rigurosamente en [18, 19] y que se basa en las ecuaciones de Stratonovich-Kushner (SKE) [7, 8], con las cuales se puede describir la ecuación dinámica de la función de densidad de probabilidad (PDF) a posteriori del caos $x(t)$. Nótese que la evolución temporal de la PDF a posteriori para $x(t)$ está completamente caracterizada por la SKE, sin embargo, no tiene solución analítica exacta. Una de las pocas excepciones es usar una SDE lineal, es decir, el bien conocido algoritmo del filtro de Kalman. Justamente por esta razón es que los algoritmos de filtraje no lineal prácticamente siempre se simplifican haciéndolos cuasióptimos o incluso cuasilineales.

Uno se podría preguntar: ¿qué ventajas ofrece el modelaje caótico para el filtraje de señales débiles? Resulta ser que la solución de las SKE para la ODE dinámica del caos (1) presenta propiedades de singularidad cuando la solución está prácticamente sintonizada con el caos determinístico en (1) independientemente del valor de la SNR [18].

Un conjunto importante de algoritmos de filtraje cuasi lineal aplica la aproximación gaussiana local (LGA) para la PDF a posteriori [8, 19] lo cual resulta ser idóneo para aplicaciones en tiempo real. Algunos de dichos algoritmos son:

- Filtro Extendido de Kalman (EKF)
- Filtro de Kalman desnaturalizado (UKF)
- Filtro de Kalman en quadratura (QKF)
- Filtro en cuadratura Gauss-Hermite (GHF)
- Filtro condicionalmente óptimo, etc.

Nótese que la diferencia entre los algoritmos basados en la LGA depende solamente de cómo se escoge la ubicación del estimado instantáneo de $x(t)$. Para el caso de una alta precisión de filtraje todos los algoritmos que aplican LGA [18] pueden ser exitosamente aproximados mediante el EKF porque el valor correcto del proceso filtrado y el punto de referencia para la aplicación de la aproximación gaussiana son obviamente muy cercanos.

Todos estos algoritmos de filtraje tienen, dada una cierta SNR, diferente precisión y una complejidad computacional completamente diferente para una calidad de filtraje preestablecida. Al seleccionar algún algoritmo de filtraje específico para un escenario concreto, es necesario considerar, como posibles criterios, el NMSE junto con la complejidad computacional.

2.2. Complejidad computacional

En aplicaciones del mundo real la complejidad computacional de los algoritmos cuasilineales es fundamental. Para el caso concreto de los algoritmos EKF, UKF, QKF y GHF la complejidad computacional se puede analizar en términos de operaciones de sumas y multiplicaciones, descomposición Cholesky, propagación no lineal y cálculo jacobiano. Nuestra evaluación en estos términos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Complejidad computacional

	EKF	UKF	GHF	QKF
Sumas	8	50	25	25
Multiplicaciones	15	77	33	40
Descomposición Cholesky	1	2	2	2
Propagación no lineal	0	15	21	6
Cálculo jacobiano	1	0	0	0

Se puede notar que el UKF presenta una mayor complejidad, mientras que el EKF es el menos complejo. El EKF podría degradarse debido al cálculo jacobiano (evaluación de derivadas parciales) si las

ecuaciones del atractor son sofisticadas. Sin embargo, para los modelos de las fórmulas (2)-(4), la estructura de filtraje basada en el EKF es la mejor opción. Como se mostrará más adelante, para detección de señales débiles reales se puede lograr una fidelidad bastante aceptable en todos los casos prácticos usando una estructura de filtraje basada en el EKF que internamente usa modelos caóticos tipo (2)-(4).

Como alternativa a los algoritmos cuasilineales del EKF, donde la linealización se actualiza instantáneamente, se puede buscar una solución robusta y de baja complejidad computacional usando una «linealización fija» (con una matriz de linealización predefinida para el problema específico bajo estudio) en vez de la linealización instantánea. De hecho, eso significa que se estaría usando el filtro estándar de Kalman (SKF) [7–11] en vez del EKF y por consecuencia, aunque se tendría una menor complejidad, se tendrían también pérdidas en la precisión del filtraje. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la LGA de la PDF a posteriori supone que de hecho todas las componentes del modelo son casi lineales y por lo tanto las pérdidas de precisión podrían ser moderadas.

Nótese que cuando los datos de entrada son variables es muy común que los algoritmos de filtraje cuasióptimo apliquen estrategias de linealización.

2.3. Procesamiento multimomento

Para mejorar fidelidad del filtraje se requiere aprovechar toda la información disponible en la señal bajo procesamiento. Para esto en la metodología de filtraje, aplicando las ecuaciones de SKE, tiene sentido incorporar información adicional (en diferentes instantes de tiempo secuenciales) de la señal compuesta que se ha recibido; es decir, se debe considerar información en forma de bloques (en diferentes instantes de tiempo, es decir, procesamiento multimomento). Los algoritmos multimomento se implementan a través de la generalización de las SKE usando datos multimomento.

Los algoritmos de filtraje multimomento resultan poco prácticos para implementaciones en tiempo real ya que el retardo debido al procesamiento de muestras de diferentes instantes de tiempo es significativo. Para lograr un compromiso entre complejidad y aumento de precisión de filtraje es razonable considerar el procesamiento de solo dos muestras adyacentes. Este procesamiento se conoce como régimen de dos momentos (2MM), es un caso especial del filtraje multimomento y puede ser revisado con detalle en [18, 19].

En el régimen 2MM durante cada ciclo de filtraje se procesan dos muestras provenientes de dos instantes de tiempo (procesamiento no instantáneo), por lo que el coeficiente de correlación entre las dos muestras adyacentes (denotado como ρ) es un parámetro de diseño. La ventaja de considerar régimen 2MM, es que se pueden tener los beneficios del procesamiento mul-

timomento prácticamente sin retardos significativos.

En el régimen unimomento (1MM) durante cada ciclo se procesa una muestra de un solo instante de tiempo (procesamiento instantáneo), no aumenta la precisión del filtraje y es justamente el tipo de procesamiento característico del EKF y sus variantes listadas anteriormente.

2.4. Modelo de simulación

La implementación práctica de la metodología propuesta se llevó a cabo desarrollando un banco de pruebas de simulación basado en MatLab.

La metodología está compuesta por dos elementos:

- 1) Una estructura de filtraje dinámico no lineal basada en el filtro de Kalman (EKF o SKF según sea el caso).
- 2) Modelaje apropiado de la señal débil real congruente con la estructura de filtraje a usar (EKF o SKF).

Para la simulación mediante MatLab se usa la versión discreta del filtro de Kalman y para dar continuidad a la exposición se reproduce a continuación. La dinámica de estados en un sistema discreto está dada por:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k) + \varepsilon_k \\ y_k &= s(x_k) + n_{0ks} \end{aligned} \quad (6)$$

donde x_k representa el estado del sistema y y_k una medición del estado del sistema, $\{n_{0k}\}$ y $\{\varepsilon_k\}$ son procesos independientes de ruido blanco Gaussiano con media cero y matrices de covarianza

$$E[n_{0k}n_{0k}^T] = N_{0k} \quad y \quad E[\varepsilon_k\varepsilon_k^T] = Q_k$$

respectivamente, Q_k denota ruido de proceso y ruido de medición. Los ciclos de predicción y corrección del filtro de Kalman están dados por:

$$\begin{aligned} \text{Predicción} &\begin{cases} \hat{x}_{k+1}^- = f(x_k^+) \\ P_k^- = A_k P_k^+ A_k^T + Q_k \end{cases} \\ \text{Corrección} &\begin{cases} G_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + N_{0k}]^{-1} \\ \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + G_k [y_k - s(x_k^-)] \\ P_k^+ = P_k^- + G_k H_k P_k^- \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

donde G_k es la ganancia de Kalman, \hat{x}_k^- es el estimado a priori del estado en el k -ésimo ciclo de actualización, \hat{x}_k^+ es el estimado a posteriori del estado en el k -ésimo ciclo de actualización, P_k^- , P_k^+ son respectivamente las estimaciones a priori y a posteriori de las matrices de covarianza en la k -ésima etapa, A_k es la matriz de linealización (o de transición de estados) y H_k es la matriz que indica la relación entre la medición

y el vector de estado en el ciclo k -ésimo suponiendo ausencia de ruido. Para el caso del SKF A_k es una matriz fija en cada ciclo mientras que para el EKF la matriz se actualiza en cada ciclo mediante el cálculo jacobiano:

$$A_k = \frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k} \quad (8)$$

Al usar el EKF la estructura del filtro está dada por (7), para la función $f(x_k)$ se usa (2), (3) ó (4) y la linealización según (8). Aquí se modela la señal débil real usando alguno de los procesos caóticos (2)-(4), es decir, se analiza cuál de las componentes (x , y o z) de (2), (3) o (4) es la más adecuada para ser usada como modelo. Para este propósito, primero el tiempo de muestreo (T_s) de las ecuaciones caóticas discretas se modifica hasta lograr una coincidencia entre las variaciones temporales de la componente del atractor caótico seleccionado y la señal real (hacer que las escalas de tiempo sean lo más cercanas posible). Segundo la señal deseada se normaliza en relación con la media y la varianza de la componente del atractor. En [18,19] se ha demostrado que la componente x de los tres atractores caóticos (2)-(4) es la más adecuada para modelar señales experimentales. Después de llevar a cabo el mismo análisis de modelaje se encontró que el mismo criterio es aplicable para las señales fenomenológicas de este trabajo.

Cuando se usa el SKF la matriz A_k es fija y el modelaje de la señal real debe reflejarse justamente en A_k . Con este propósito se emplea la herramienta de identificación de sistemas de MatLab que denotaremos como SIT [20] (del inglés *System Identification Toolbox*). Dicha herramienta está basada en la teoría de identificación de sistemas [21]. Para identificar a la señal real (sísmica, ECG, tipo voz, RFI) la SIT de MatLab analiza sus propiedades espectrales y arroja como modelo una matriz constante.

La parte experimental de la siguiente sección muestra que es posible usar dicha matriz justamente como una matriz de linealización fija en la estructura de filtraje dada por (7), lo cual es en realidad solo una aproximación del procedimiento de linealización instantáneo que se requiere para el filtraje cuasióptimo cuando se usa la LGA.

Para hacer una comparación justa con el EKF, de dimensión 3 según las fórmulas (2)-(4), se diseña un SKF tridimensional. Para obtener la matriz A_k mediante la SIT de MatLab se usa el comando «ident». La identificación (de la señal sin ruido) se hace seleccionando la opción «state space models» [7,22] para el caso tridimensional. El programa ofrece tres opciones de estimación (método de subespacio, reducción regularizada y minimización del error de predicción) y al final indica el porcentaje de confianza para cada opción. Experimentalmente se encontró que la opción de minimización del error de predicción ofrece el mejor

porcentaje de confianza para la estimación de la matriz.

En la metodología propuesta aquí la identificación de sistemas es justamente un modelaje de la señal real. Se hace la identificación para un vector (lo más grande posible) de la señal real (sin ruido). Suponiendo que las señales bajo estudio son estacionarias, la matriz de identificación de sistema puede considerarse como la matriz de linealización fija A_k y, por lo tanto, ser un modelo de señal para cualquier otro vector más corto de la misma señal fenomenológica. Al usar la matriz

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1}^- &= f(\hat{x}_k^+) \\ P_k^- &= A_k P_k^+ A_k^T + Q_k \\ G_k &= P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + N_{0k}]^{-1} \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + G_k [y_k - s(x_k^-)] \\ P_k^+ &= P_k^- + G_k H_k P_k^- \end{aligned} \quad \begin{aligned} {}_2\hat{x}_{k+1}^- &= f({}_2\hat{x}_k^+) \\ {}_2P_k^- &= {}_2A_k P_k^+ (1 - \rho^2) {}_2A_k^T + Q_k \\ {}_2G_k &= {}_2P_k^- {}_2H_k^T [{}_2H_k {}_2P_k^- {}_2H_k^T + N_{0k}]^{-1} \\ {}_2\hat{x}_k^+ &= {}_2\hat{x}_k^- + {}_2G_k [y_k - s({}_2x_k^-)] \end{aligned} \quad (9)$$

Donde el subíndice 2 del lado izquierdo de cada variable denota una variable 2MM. Para este algoritmo de filtraje se tiene en la columna izquierda la estructura dada por (7) y en la columna derecha la única diferencia es que la última operación del ciclo de corrección no existe, ambas columnas operan en paralelo. En (7) la salida del filtro es \hat{x}_k^+ mientras que en (9) es ${}_2\hat{x}_{k+1}^-$. En el régimen 2MM en la columna del lado derecho en la última operación del ciclo de predicción se calcula el estimado a priori de la matriz de covarianza tomando en cuenta el coeficiente de correlación ρ de las dos muestras. Obsérvese que la estructura (9) puede operar tanto para el EKF como para el SKF siguiendo las observaciones descritas en párrafos anteriores.

En la siguiente sección se muestra de manera experimental la eficiencia del filtraje aquí propuesto considerando señales de naturaleza significativamente diferente, tales como, señales sísmicas, señales electrocardiográficas fetales (FECG), señales tipo voz y señales de interferencia de radiofrecuencia (RFI). Tales señales pueden considerarse caóticas [1, 2, 12, 15, 23, 24]

3. Resultados y discusión

Los siguientes resultados muestran el filtraje mediante SKF y EKF tanto para el régimen 1MM como para 2MM. En el régimen 2MM el parámetro ρ determina una diferente fidelidad en el filtraje. Si $\rho = 0$, se tiene el régimen 1MM (sin incremento en la fidelidad). Si $\rho = 1$, vea fórmula (9), se tiene una condición de singularidad con una matriz de covarianza igual a cero (fidelidad que tiende a $+\infty$).

Se escogió $\rho = 0.85$ para un análisis homogéneo de resultados.

Las figuras muestran las curvas traslapadas de la

de identificación en la estructura del SKF se logra un procesamiento con información a priori y con datos experimentales.

Para lograr una mayor fidelidad de filtraje se emplea el régimen 2MM. Tal y como se comenta en [19] las soluciones cuasi óptimas (en este caso para algoritmos multimomento) tienen como base alguna heurística que puede incorporar conocimiento y/o estructuras previas. Siendo así, el régimen 2MM que se ha utilizado en este trabajo tiene la forma:

señal original (sin ruido) y la señal después filtrarse con el esquema de filtraje y régimen correspondiente que se indica en cada figura. Las figuras muestran solo un caso de umbral de señal débil cuando la $SNR = -3dB$. Manipulando N_0 para analizar diferentes umbrales de señales débiles ($SNR \leq 0dB$), las tablas 2-5 muestran el desempeño del SKF y EKF bajo los regímenes 1MM y 2MM en términos del NMSE (descrito en párrafos de la introducción). También se muestran los tiempos promedio (en segundos) que se requieren para procesar 5000 muestras para cada uno de los fenómenos estudiados y sus correspondientes filtrajes.

Tanto para el SKF como el EKF se hace un modelaje imperfecto de la señal fenomenológica (existe un cierto grado de incertidumbre en las condiciones iniciales para el filtraje), por eso un valor de ruido de proceso débil, vea Q en (7) y (9), debe incluirse en la estructura de filtraje (valor de Q indicado en las tablas 2-5).

Para las señales sísmicas no se presentan resultados del SKF porque no fue posible obtener la correspondiente matriz de linealización fija (matriz de identificación de sistemas) ya que dichas señales tienen una duración muy limitada para un adecuado análisis espectral mediante la SIT.

3.1. Experimento 1. Señales electrocardiográficas fetales (FECG)

Los datos experimentales se obtuvieron de la base de datos de PhysioNet [25]. La señal para este experimento corresponde al corazón de un producto fetal en la semana 36 de gestación. Para una $SNR = -3dB$ la Figura 1 muestra la señal original y la señal filtrada usando el EKF 1MM con la componente x de Rossler como modelo. La Tabla 2 muestra los resultados completos.

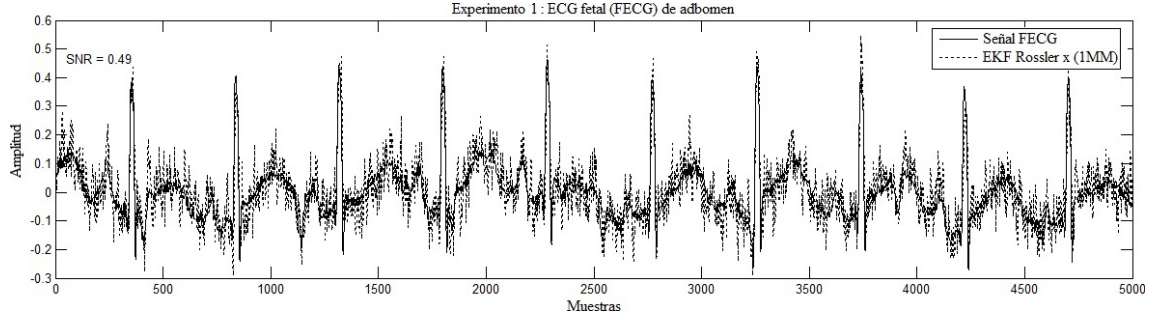


Figura 1. Señales en el experimento 1

Tabla 2. Resultados del NMSE para el experimento 1

SNR	0 dB	-3 dB	-10 dB	Tiempo de procesamiento
SKF $Q = 0.04$ (con matriz de linealización A_k)				
1MM	0.0025	0.0037	0.0078	0.43 s
2MM	0.0021	0.0032	0.0065	0.89 s
EKF Rossler x $Q = 0.21$				
1MM	0.0026	0.0040	0.0098	1.825 s
2MM	0.0023	0.0036	0.0079	3.503 s
EKF Lorenz x $Q = 0.42$				
1MM	0.0029	0.0042	0.010	1.782 s
2MM	0.0023	0.0034	0.0083	3.59 s
EKF Chua x $Q = 0.075$				
1MM	0.0034	0.0053	0.015	1.812 s
2MM	0.0026	0.0042	0.012	3.61 s

3.2. Experimento 2. Señales de tipo voz

Para este experimento se usaron sonidos sostenidos de vocales (vocal «o»). Este tipo de señales se usan para procedimientos de síntesis de voz [23]. La Figura 2 muestra con línea continua el sonido sostenido de la vocal «o» (grabado durante 5 segundos a 22 050

Hz) y con línea punteada la señal filtrada usando el SKF 2MM con su matriz evaluada mediante el SIT. Los resultados (muy semejantes al experimento anterior) se muestran en la Tabla 3. Para este experimento ninguna de las componentes del atractor de Lorenz resultó adecuada para modelar las señales tipo voz.

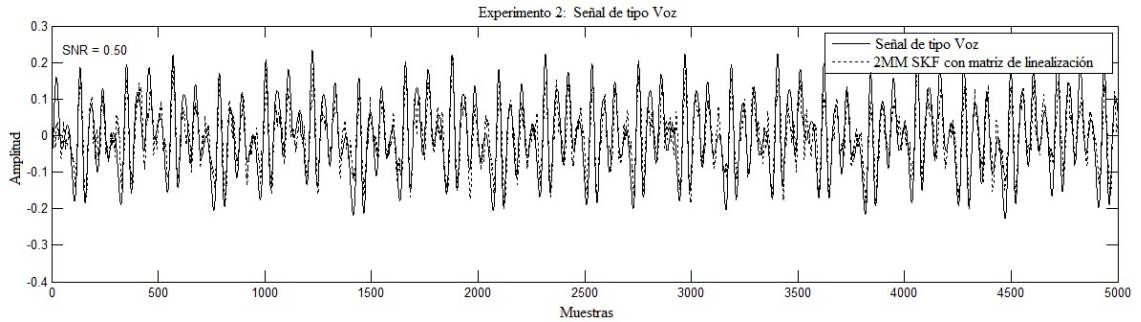


Figura 2. Señales en el experimento 2

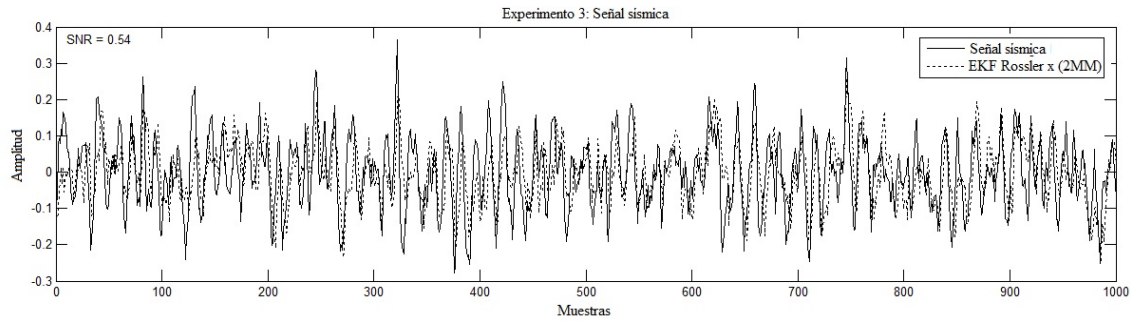
Tabla 3. Resultados del NMSE para el experimento 2

SNR	0 dB	-3 dB	-10 dB	Tiempo de procesamiento
SKF $Q = 0.0081$ (con matriz de linealización A_k)				
1MM	0.0025	0.0037	0.0079	0.47 s
2MM	0.0015	0.0024	0.0053	0.95 s
EKF Rossler x $Q = 0.23$				
1MM	0.0029	0.0044	0.0124	1.792 s
2MM	0.0027	0.0039	0.011	3.611 s
EKF Chua x $Q = 0.76$				
1MM	0.0031	0.0048	0.0137	1.81 s
2MM	0.0025	0.0043	0.0130	3.58 s

3.3. Experimento 3. Señales sísmicas

Para este experimento se usó un simulador de MatLAB basado en los modelos sísmicos reportados en [26]. Para una $SNR = -3dB$, la Figura 3 muestra una señal sísmica

y su versión filtrada usando el EKF 2MM con la componente x de Rossler como modelo. Los resultados completos se muestran en la Tabla 4. Para la señal sísmica no fue posible obtener la matriz de linealización por lo que no se reporta el SKF para este caso.

**Figura 3.** Señales en el experimento 3**Tabla 4.** Resultados del NMSE para el experimento 3

SNR	0 dB	-3 dB	-10 dB	Tiempo de procesamiento
EKF Rossler x $Q = 0.35$				
1MM	0.0048	0.0074	0.0178	1.79 s
2MM	0.0047	0.0073	0.0135	3.53 s
EKF Lorenz x $Q = 0.135$				
1MM	0.0058	0.0093	0.0245	1.807 s
2MM	0.0054	0.0081	0.0187	3.62 s
EKF Chua x $Q = 0.135$				
1MM	0.0057	0.0095	0.029	1.816 s
2MM	0.0051	0.0084	0.023	3.65 s

3.4. Experimento 4: Señales de RFI

Este experimento considera la RFI generada por equipo de cómputo [24, 27] y que afecta la transmisión de señales de información deseadas. Para una

$SNR = -3dB$ la Figura 4 muestra la señal de RFI y su versión filtrada usando el SKF 1MM con su matriz de linealización evaluada mediante el SIT. La Tabla 5 muestra los resultados completos.

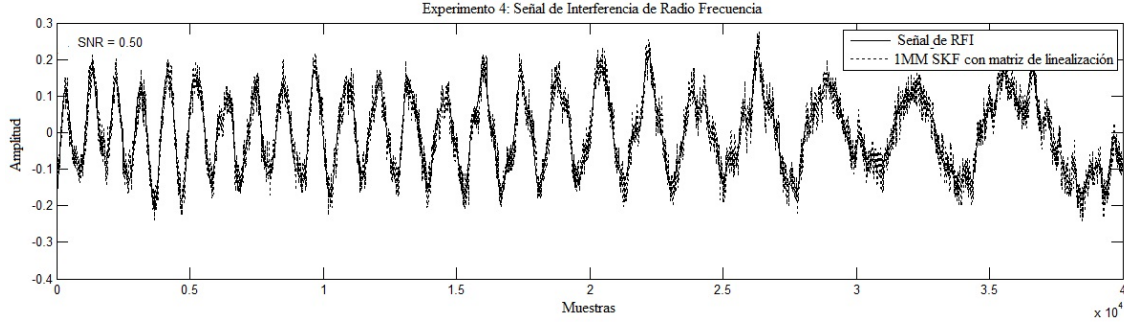


Figura 4. Señales en el experimento 4

Tabla 5. Resultados del NMSE para el experimento 4

SNR	0 dB	-3 dB	-10 dB	Tiempo de procesamiento
SKF $Q = 0.02$ (con matriz de linealización A_k)				
1MM	0.0018	0.003	0.0098	0.51 s
2MM	0.0015	0.0025	0.0085	0.92 s
EKF Rossler x $Q = 0.2$				
1MM	0.0026	0.005	0.019	1.872 s
2MM	0.0023	0.0036	0.011	3.9 s
EKF Lorenz x $Q = 0.6$				
1MM	0.0023	0.0032	0.04	1.76 s
2MM	0.0016	0.0027	0.0083	3.81 s
EKF Chua x $Q = 0.4$				
1MM	0.0034	0.0053	0.035	1.86 s
2MM	0.0026	0.0042	0.029	3.77 s

De las tablas se observa que el método 2MM muestra un NMSE ligeramente mejor. Todas las metodologías de filtraje presentadas son bastante efectivas, ya que se caracterizan por un valor muy bajo del NMSE. En el escenario de $SNR = -10dB$ (una señal extremadamente débil) es virtualmente imposible distinguir visualmente (no se muestra en figuras por razones de espacio) las señales deseadas de entre el ruido, sin embargo, el valor del NMSE tiene valores de alrededor del 1 % para el filtraje mediante SKF y para el EKF, tanto para la metodología 1MM como para 2MM.

Hay que tener en cuenta que la metodología 2MM consume más tiempo con respecto a la metodología 1MM, sin embargo, no es más del doble de tiempo. El filtraje mediante SKF es (casi 3 veces) más rápido

porque no hay proceso de linealización. Los tiempos de procesamiento junto con la complejidad y fidelidad del filtraje deben ser criterios de elección para escoger el algoritmo de filtraje adecuado para cada implementación concreta.

El SKF con matriz de linealización fija (modelando la señal de interés mediante una matriz de identificación de sistema) muestra los mejores resultados, lo cual indica que para el procesamiento de algoritmos cuasilineales de filtraje, la influencia de las propiedades espectrales de los datos de entrada prevalece sobre la influencia de las estadísticas no gaussianas. Los valores del NMSE obtenidos en las simulaciones son muy semejantes para el filtraje de las diferentes señales, por lo que en la práctica no es realmente determinante el modelo particular del atractor caótico o la matriz

de linealización (obtenida a partir de la SIT) que se aplica.

¿Por qué ocurre esto? Todos los atractores caóticos que hemos empleado para modelar las señales reales, generan caos como un proceso estocástico cuasideterminista. Por eso todos los algoritmos de filtraje cuasi óptimo mencionados antes (incluido el EKF y sus modificaciones) que aplican la idea del modelaje caótico, operan en un régimen muy próximo a la singularidad, es decir, la forma de la PDF a posteriori se concentra alrededor de la PDF a priori de la señal deseada independientemente del valor de la SNR [18, 19] y eso justamente permite obtener valores tan bajos del NMSE para señales muy débiles (SNR menores a 0 dB y hasta -10 dB). Así que, para el filtraje de alta fidelidad, el término lineal de la expansión en series de Taylor para el algoritmo cuasilineal [8, 9, 22] es significativamente más determinante que los términos relacionados a las no linealidades (matriz jacobiana, etc.), es decir, la aproximación lineal es suficiente.

4. Conclusiones

Para el procesamiento de señales débiles se ha propuesto utilizar una estructura de filtraje simple y robusta que está basada en el filtro de Kalman. Esta estructura permite la incorporación del régimen 2MM lo cual mejora la precisión del filtraje.

Para señales fenomenológicas no gaussianas, dependiendo del escenario específico, de los requerimientos de complejidad computacional y error tolerable, se puede recurrir al EKF usando señales caóticas como modelo de las señales reales. O bien, se puede recurrir al SKF con una matriz de linealización fija, es decir, se usa la herramienta SIT de MatLab para evaluar la matriz de identificación de sistemas y se usa como modelo de la señal real. Esto permite un «grado significativo de libertad» para el diseño del bloque de filtraje.

Los resultados experimentales muestran gran precisión en el filtraje de señales débiles para todos los escenarios aquí considerados y dada la naturaleza tan diversa de dichos escenarios muy probablemente se pueda aplicar en otros escenarios (trabajo futuro).

Referencias

- [1] Y. Li, B. Yang, Y. Yuan, X. Zhao, and H. Lin, “Ability to detect weak effective seismic signals by utilizing chaotic vibrator system,” *Chinese Science Bulletin*, vol. 51, pp. 3010–3017, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2191-0>
- [2] Y. Li, B. J. Yang, J. Badal, X. P. Zhao, H. B. Lin, and R. L. Li, “Chaotic system detection of weak seismic signals,” *Geophysical Journal International*, vol. 178, no. 3, pp. 1493–1522, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04232.x>
- [3] J. Shu-Yao, Y. Fei, C. Ke-Yu, and C. En, “Application of stochastic resonance technology in underwater acoustic weak signal detection,” in *OCEANS 2016 - Shanghai*, April 2016, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485567>
- [4] S. L. Joshi, R. A. Vatti, and R. V. Tornekar, “A survey on ecg signal denoising techniques,” in *2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, April 2013, pp. 60–64. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CSNT.2013.22>
- [5] H. Li, R. Wang, S. Cao, Y. Chen, N. Tian, and X. Chen, “Weak signal detection using multiscale morphology in microseismic monitoring,” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 133, pp. 39–49, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.015>
- [6] R. Han, J. Li, G. Cui, X. Wang, W. Wang, and X. Li, “Seismic signal detection algorithm based on gs transform filtering and emd denoising,” in *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Dec 2018, pp. 1213–1217. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CompComm.2018.8781035>
- [7] H. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/0471221082>
- [8] A. Jazwinski, *Stochastic Processes and Filtering Theory*. Academic Press, 1970. [Online]. Available: <https://bit.ly/34iDlnz>
- [9] R. L. Stratonovich, *Topics of the Theory of Random Noise*, 1967. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PcK2DB>
- [10] W.-R. Wu and A. Kundu, “Image estimation using fast modified reduced update kalman filter,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, no. 4, pp. 915–926, April 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/78.127963>
- [11] R. Parseh, K. Kansanen, and D. Slock, “Distortion outage analysis for joint space-time coding and kalman filtering,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 9, pp. 2291–2305, May 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2655493>
- [12] M. de Sousa Vieira, “Chaos and synchronized chaos in an earthquake model,”

- Physical Review Letters*, vol. 82, pp. 201–204, Jan 1999. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.201>
- [13] G. Kolumban, M. P. Kennedy, and L. O. Chua, “The role of synchronization in digital communications using chaos. i . fundamentals of digital communications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 10, pp. 927–936, Oct 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/81.633882>
- [14] G. Kaddoum, “Design and performance analysis of a multiuser ofdm based differential chaos shift keying communication system,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 1, pp. 249–260, Jan 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2502259>
- [15] N. V. Thakor, “Chaos in the heart: signals and models,” in *Proceedings of the 1998 2nd International Conference Biomedical Engineering Days*, May 1998, pp. 11–18. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IBED.1998.710541>
- [16] P. J. García-Laencina and G. Rodríguez-Bermudez, “Analysis of eeg signals using nonlinear dynamics and chaos: A review,” *Applied Mathematics & Information Sciences*, pp. 2309–2321, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Pg2NGa>
- [17] V. S. Anishchenko, V. Astakhov, A. Neiman, T. Vadivasova, and L. Schimansky-Geier, *Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1007/978-3-540-38168-6>
- [18] V. Kontorovich and Z. Lovtchikova, “Nonlinear filtering of chaos for real time applications,” in *Selected Topics in Nonlinear Dynamics and Theoretical Electrical Engineering*, K. Kyamakya, W. A. Halang, W. Mathis, J. C. Chedjou, and Z. Li, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 41–59. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37781-5_3
- [19] V. Kontorovich, Z. Lovtchikova, and F. Ramos-Alarcon, *Nonlinear Filtering of Weak Chaotic Signals*, 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.5772/intechopen.70717>
- [20] E. Nikulchev, “Simulation of robust chaotic signal with given properties,” *Advanced Studies in Theoretical Physics*, vol. 8, no. 21, pp. 939–944, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.12988/astp.2014.48106>
- [21] L. Ljung, *System Identification: Theory for the user*. Prentice Hall PTR, 1999. [Online]. Available: <https://bit.ly/2YIDEaj>
- [22] V. Pugachev and I. Sinitzyn, *Stochastic Differential systems Analysis and Filtering*. John Wiley & Sons, 1987. [Online]. Available: <https://bit.ly/2qKkrZc>
- [23] M. Banbrook, S. McLaughlin, and I. Mann, “Speech characterization and synthesis by nonlinear methods,” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 1–17, Jan 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/89.736326>
- [24] D. Ilitzky Arditti, A. Alcocer Ochoa, V. Kontorovich Mazover, and F. Ramos Alarcon Barroso, “Adaptive mitigation of platform-generated radio-frequency interference,” Patent US 2015.0051880A1, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Pesh6G>
- [25] Physionet. (2019) Physiobank atm. [Online]. Available: <https://bit.ly/2LMxcKf>
- [26] F. R. Rofooei, A. Mobarake, and G. Ahmadi, “Generation of artificial earthquake records with a nonstationary kanai-tajimi model,” *Engineering Structures*, vol. 23, no. 7, pp. 827–837, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00093-6)
- [27] E. X. Alban, M. E. Magana, H. G. Skinner, and K. P. Slattery, “Statistical modeling of the interference noise generated by computing platforms,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 3, pp. 574–584, June 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TEM.2011.2164255>

NORMAS PARA PUBLICAR EN LA REVISTA INGENIUS

1. Información General

INGENIUS es una publicación científica de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2007, con periodicidad fija semestral, especializada en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Ciencias de la Computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica; estas líneas de acción fortalecen áreas como automatización, control, robótica entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*doble-blind review*), conforme a las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

INGENIUS se encuentra indexada en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – Latindex, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto – DOAJ, en la Matriz de Información para el Análisis de Revistas – MIAR, en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico – REDIB y en repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-650X) y electrónica (e-ISSN: 1390-860X), en idioma español, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital

Object Identifier System). Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista INGENIUS publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (*state-of-the-art*).

- **Investigaciones:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.
- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se

valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <<https://goo.gl/xB0wE1>>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <<https://goo.gl/4xxjuo>>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:

<revistaingenius@ups.edu.ec>,

<jcalles@ups.edu.ec> ó

<mquinde@ups.edu.ec>.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente

en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o L^AT_EX(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para L^AT_EX en: <<https://goo.gl/Mwv8IC>>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. Título (español) / Title (inglés):

Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español

y viceversa si está escrito en inglés.

2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Presentación (Cover Letter):** Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, con la confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <<https://goo.gl/XAc9a3>>.

3.1.2. Manuscrito

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español

y viceversa si está escrito en inglés.

2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatura más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.
6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es

necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.
11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto. Su número debe ser suficiente

para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

- [1] J. Riess, J. J. Abbas, "Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation". IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/7333.948462>

Libros:

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics" in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw–Hill, 1964, pp. 15–64.

Reportes Técnicos:

- [1] M. A. Brusberg and E. N. Clark, "Installation, operation, and data evaluation of an oblique–incidence ionosphere sounder system," in "Radio Propagation Characteristics of the Washington–Honolulu Path," Stanford Res. Inst., Stanford, CA, Contract NOBSR–87615, Final Rep., Feb. 1995, vol. 1

Artículos presentados en conferencias (No publicados):

- [1] Vázquez, Rolando, Presentación curso "Realidad Virtual". National Instruments. Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Publicados):

- [1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Taboada. "Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico," IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, “Computación paralela y entornos heterogéneos,” Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100-1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28

cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, de manera obligatoria dos archivos se deberán cargar, como archivo original el manuscrito en .pdf sin datos de autor y anonimizado, mientras que en archivos complementarios se deberá cargar la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito, adicionalmente se deberá cargar el manuscrito completo en .doc o .docx (archivo de Word), es decir con los datos del autor/es y su adscripción institucional; también se deben cargar en archivos independientes las

figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi.

Todos los autores deben ingresar la información requerida en la plataforma OJS y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC
- Debe estar en el formato de la revista INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

La comprobación antes descrita puede llevar hasta 4 semanas.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
 - Publicable
 - Publicable con cambios sugeridos
 - Publicable con cambios obligatorios
 - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1° de enero y el 1° de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.