Número: 24
Redalyc 3.0
ESCI Web of science
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN : 1390-650X
eISSN : 1390-860X
julio / diciembre 2020

INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología

- Estimación del efecto de la resistencia en la corriente de cortocircuito mediante un análisis de sensibilidad
  Pag. 9
- Control para el voltaje de salida de un inversor multinivel de capacitores flotantes
  Pag. 68
- Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada
  Pag. 36
- Análisis numérico de un sistema de calentamiento de agua utilizando un colector solar de placa plana
  Pag. 97

Ingenius

Ingenius • Número 24 • julio/diciembre 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 Eléctronica, 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 Asociado.

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.

Filipe 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.

Filipe 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 2020, 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 Bolivar, 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 Nacional 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 Bolivar, Venezuela.

Eduardo Matallanas, 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 Milan, 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, Medellin, 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, Medellin, 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.

Celso 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 Brasilia, Brasil.

Gilmar Barreto, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

Ricardo Emilio F. Quevedo Nogueira, PhD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

Weslley 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 Rosero, 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, Medellin, 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, Medellin, Colombia.

Marcelo Flores Vazquez, MSc, 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, Medellin, 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 Tecnica 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, Medellin, 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 Bolivar, 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 Tufiño Cárdenas, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Fernando Urgiles Ortíz, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Juan Valladolid Quitoisaca, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Efrén Vázquez Silva, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Julio Verdugo, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Mary Vergara Paredes, PhD, Universidad de los Andes, Merida, 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, PhD
Floralba Aguilar Gordón, PhD
Sheila Serrano Vincenti, MSc
Pedro Rodríguez López, MSc
René Unda Lara, PhD
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
Christian Sinchi Narvaez
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 Curiel Avila

Tiraje: 800 ejemplares

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento LaTeX.

Ingenius

Revista de Ciencia y Tecnología

Número 24, julio – diciembre 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 Passau – Fakultät für Informatik und Mathematik
BSB Bayerische StaatsBibliothek – Information in erster Linie
Deutsches Museum
Hochschule Rosenheim – University of Applied Sciences
Hochschule Landshut – Hochschule für angewandte Wissenschaften
Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf – University of Applied Sciences
Technische Universität München
Universität der Bundeswehr München
LMU Ludwig-Maximilians-Universität München
Technische Hochschule Ingolstadt
Hochschule Augsburg – University of Applied Sciences
Hochschule Kempten – University of Applied Sciences
HNU Hochschule Neu-Ulm – University of Applied Sciences
OTH Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Staatliche Bibliothek Neuburg an der Donau
Staatliche Bibliothek Regensburg
Staats- und Stadtbibliothek Augsburg
Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg
Universitätsbibliothek Augsburg – UBA
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt
Universität Regensburg
Hochschule Ansbach
Coburg University – of applied sciences and arts
hochschule hof – University of Applied Sciences
Hochschule Merseburg (FH) – University of Applied Sciences
ThULB – Thüringer Universitäts- und Landesbibliothek Jena
EZB – Elektronische Zeitschriftenbibliothek
Universität Bamberg
Universität Bayreuth
FAU – Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Bauhaus-Universität Weimar
UB WÜ
Freie Universität Berlin
FH Erfurt – Fachhochschule Erfurt University of Applied Sciences
h2 Hochschule Magdeburg • Stendal
htw. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin – University of Applied Sciences
UB Braunschweig
Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover
Gottfried Wilhelm Leibniz Bibliothek – Niedersächsische Landesbibliothek

Editorial

Estimadas y estimados lectores:

El año 2020 nos ha traído una grave pandemia derivada de la COVID-19. Hasta ahora pensábamos que esta situación que estamos viviendo, era más bien, un guion de película de ciencia ficción. Pero como tantas veces hemos podido comprobar, en ocasiones (más de las que nos gustaría admitir), la realidad supera a la ficción; y eso es lo que ha ocurrido y está ocurriendo en estos complicados meses.

La pandemia de la COVID-19 nos ha llevado a situaciones límite: colapso de sistemas sanitarios, confinamiento en casa para evitar propagación del virus, cambio de la docencia presencial a no-presencial, paro de las empresas productivas, cierre de fronteras, etc. Esta parálisis derivada del confinamiento ha puesto de manifiesto el qué y el qué no es necesario para el funcionamiento de una sociedad. Por encima de todo, esta crisis médica, con su repercusión social y económica, ha puesto de manifiesto que hay muchas cosas prescindibles, y otras, que son absolutamente imprescindibles. Los sistemas sanitarios se han visto desbordados en muchos países, la actuación de los cuerpos de seguridad de los países no daba abasto para garantizar la seguridad de los ciudadanos; los Gobiernos tenían que tomar medidas difíciles.

En definitiva, este virus ha puesto en jaque a todo el planeta, con mayor o menor intensidad, pero hemos aprendido mucho de esta situación. Hemos aprendido a apreciar la profesionalidad y vocación del personal sanitario. Hemos aprendido a adaptarnos. Hemos aprendido a desarrollar nuestra actividad profesional a través de videoconferencia, en la medida de lo posible. Hemos aprendido que la seguridad de nuestra sociedad se sustentaba sobre unas estrictas medidas de confinamiento. Hemos aprendido a «quedarnos en casa», sin poder abrazar y convivir con nuestros seres más queridos, amigos, compañeros. Hemos aprendido que un virus, como tantos a los que nos enfrentamos cada día, puede poner en serio peligro a la humanidad. Y ahí es donde entra otro aspecto que hemos aprendido.

Hemos aprendido a necesitar y demandar I+D para superar esta crisis. Prácticamente desde los primeros compases de la pandemia, se solicitaba colaboración e investigación en diferentes ámbitos. Desde el primer día, ya se estaba trabajando en el desarrollo, en meses venideros, de una posible vacuna que evite esta pandemia. Desde el sistema sanitario se solicitaba a los sectores tecnológico, empresarial y universitario el apoyo con ideas y desarrollos para fabricación de respiradores improvisados, sistemas de protección, sistemas de desinfección, protocolos de actuación, etc.

Todo ello tiene un denominador común: inversión en I+D. Sin I+D (y transferencia) estamos condenados a no evolucionar y no poder hacer frente a otras situaciones que nos pueda deparar el futuro.

El compromiso de INGENIUS con la ciencia, tecnología y la generación de ideas innovadoras, siempre ha sido muy sólido. A lo largo de estos meses INGENIUS ha continuado su actividad que, en definitiva, es poner a disposición de la sociedad, los conocimientos del ámbito de la ciencia, tecnología e ingeniería, que permitan desarrollar soluciones tecnológicas en momentos de crisis, y contribuir al desarrollo sostenible de nuestra sociedad. Es cierto que la I+D es absolutamente necesaria, pero asimismo es cierto que la transferencia de tecnología, también lo es, puesto que permite aplicar la I+D en productos y servicios útiles y necesarios para nuestra sociedad.

Quizás todavía no sepamos qué no es necesario, pero lo que sí ha quedado evidente, es lo que sí necesitamos: inversión en investigación, desarrollo y transferencia a la sociedad y ahí, INGENIUS vuelve a reafirmar su fuerte compromiso al servicio de la comunidad científica internacional.

Rafael Antonio Balart Gimeno, PhD

EDITOR JEFE

Índice

Estimación del efecto de la resistencia en la corriente de cortocircuito mediante un análisis de sensibilidad 9
Resistance effect estimation in the short circuit current through a sensitivity analysis
Moronta R. José A. y Rocco Claudio M.

Humedad y su relación con la espectroscopía dieléctrica en agregados de concreto ... 17
Moisture in Concrete Aggregates and its relation to the Dielectric Constant
Franco Abanto, Pedro Rotta, Luis LaMadrid, Juan Soto, Gerson La Rosa, José Manrique, Gaby Ruiz y William Ipanaque

Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico 28
Rapid prototyping in the manufacture of 3D printed molds for plastic blowing
Gilberto Carrillo, Carolina Nuila y Jorge Laínez

Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada 36
Proposal for implantation of coffee drying greenhouse with parabolic cover and adapted modular structure
Bryan Briceño-Martínez, Jairo Castillo-Calderón, Rubén Carrión-Jaura y Diego Díaz-Sinche

Control de un sistema de energía basado en volantes de inercia para mitigar los huecos de tensión en el punto de conexión común 49
Control of a System of Energy based on Flywheel to mitigate the Voltage Gaps at the Point of Common Coupling
Carlos Orellana Uguña, Luis González Morales y Nuno Abreu Sousa

Detección de la muerte súbita cardíaca usando el método espectral adaptativo sobre la onda T: Estudio experimental sobre bases de datos públicas 59
Detection of sudden cardiac death using the adaptive spectral method on the T wave: An experimental study on public databases
Marco Flores-Calero y Melisa Pilla-Barroso

Control para el voltaje de salida de un inversor multinivel de capacitores flotantes ... 68
Control for the output voltage on a flying capacitor multilevel inverter
Beatriz Angélica Aguilar-López, José Antonio Juárez-Abad, Jorge Luis Barahona-Avalos, Rosalino Mayoral-Lagunes, Jesús Linares-Flores y Marco Antonio Contreras-Ordaz

Elaboración de la fibra de cabuya en tejido plano como matriz de refuerzo para la construcción de un retrovisor 81
Elaboration of the cabuya fiber in flat fabric as reinforcement matrix for the construction of a rear-view mirror
Luis Pruna, Fabián Velasco, Fabián Chachapoya y Cristian Paredes

Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos 87
Monitoring Network to Automate the Cooling System of a Data Center
José Ignacio Vega-Luna, Francisco Javier Sánchez-Rangel, Gerardo Salgado-Guzmán, José Francisco Cosme-Aceves, Víctor Noé Tapia-Vargas y Mario Alberto Lagos-Acosta

Análisis numérico de un sistema de calentamiento de agua utilizando un colector solar de placa plana 97
Numerical Analisys of a Water Heating System Using a Flat Plate Solar Collector
William Quitiaquez, José Estupiñán-Campos, C. A. Isaza-Roldán, Fernando Toapanta-Ramos y Andrés Lobato-Campoverde

Normas editoriales 107
Guidelines

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.01
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Estimación del efecto de la resistencia en la corriente de cortocircuito mediante un análisis de sensibilidad

Resistance effect estimation in the short circuit current through a sensitivity analysis

Moronta R. José A.[1,*], Rocco Claudio M.[2]

Resumen

El cálculo de los valores de corriente que fluyen en un sistema eléctrico de potencia (SEP) posterior a una falla, se denomina análisis de falla o de cortocircuito. Los valores de la corriente de cortocircuito son empleados para el dimensionamiento de los equipos de protección del SEP. Los análisis de cortocircuito tienen como una de sus premisas despreciar la resistencia eléctrica de los elementos del sistema, pues esta no afecta en mayor medida las magnitudes de las corrientes de cortocircuito. En este trabajo se propone cuantificar el efecto de la resistencia eléctrica de los elementos del SEP en la magnitud de la corriente de cortocircuito, mediante un análisis de sensibilidad (AS) e incertidumbre (AI). El AS se basa en la descomposición de la varianza de una variable de salida y puede cuantificar los efectos principales (importancia) y las interacciones de las variables consideradas. Por otro lado, el AI permite evaluar cómo las variaciones en las variables consideradas afectan la salida. La propuesta se ilustra sobre dos redes de la literatura, considerando fallas trifásica y monofásica. El resultado de nuestra propuesta muestra numéricamente que los efectos debidos a considerar la resistencia eléctrica son de hecho insignificantes en comparación con el resto de los factores que intervienen en el análisis de cortocircuito. El resultado coincide con las premisas de cálculo de las corrientes de falla supuestas en la literatura.

Palabras clave: corriente de cortocircuito, resistencia eléctrica, análisis de sensibilidad

Abstract

The assessment of the current in an electrical power system (EPS) after a fault, is generally termed short-circuit analysis. The magnitude of those currents is used for dimensioning the protection equipment of the EPS. Short-circuit analysis assumes that the electrical resistances of the components can be neglected, since they do not significantly affect the magnitude of the short-circuit currents. This work quantifies the effect of the electrical resistance of the elements of the EPS on the magnitude of the short-circuit current, by means of sensitivity (SA) and uncertainty (UA) analyses. The SA is based on the variance decomposition of an output variable, and can quantify the main effects (importance) and the interactions of the variables considered. On the other hand, The UA allows assessing how the variations in the variables considered affect the output. The proposed approach is illustrated on two networks from the literature, considering three-phase and single-phase faults. The results of such proposed approach numerically show that the effects due to taking into account the electrical resistance are indeed negligible, when compared to the rest of variables considered in the short-circuit analysis. This result coincide with the assumptions reported in the literature for the calculation of the fault currents.

Keywords: Short circuit current, electrical resistance, sensitivity analysis.

[1,*]Departamento de Tecnología Industrial, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
Autor para correspondencia ✉: jmoronta@usb.ve. https://orcid.org/0000-0002-8836-6255
[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela https://orcid.org/0000-0002-8022-0446

Recibido: 14-01-2020, aprobado tras revisión: 08-04-2020

Forma sugerida de citación: Moronta R. José A. y Rocco Claudio M. (2020). «Estimación del efecto de la resistencia en la corriente de cortocircuito mediante un análisis de sensibilidad». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 9-16. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.01.

1. Introducción

Los estudios de cortocircuito son análisis mediante los cuales se determinan las magnitudes de las corrientes eléctricas que circulan en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), durante una falla. Posteriormente, dichas magnitudes son utilizadas para especificar o validar las características de los componentes del sistema, tales como interruptores, barras, entre otros [1].

Los estudios de cortocircuito en los SEP, suponen generalmente que la resistencia eléctrica de los elementos del sistema es despreciable, y solo consideran exclusivamente la reactancia eléctrica de estos para el cálculo de la magnitud de la corriente de cortocircuito. De acuerdo con [2], para la mayoría de los cálculos de corriente de cortocircuito en media o alta tensión, y en algunos casos en baja tensión, cuando las reactancias son «mucho más grandes» que las resistencias, es lo suficientemente preciso, y más simple, despreciar las resistencias y usar solo las reactancias. Nótese como la norma no es específica, solo sugiere cuando la reactancia sea mucho mayor que la resistencia.

La misma consideración para el cálculo de corrientes de cortocircuito se realiza en el estándar [3], donde indican que el cálculo se hace mucho más fácil, pero con pérdida en la precisión, si se desprecian las resistencias, esto cuando la relación reactancia/resistencia (X/R) sea mayor a 3,33.

La bibliografía relacionada con los análisis de SEP sugiere procedimientos similares, en cuanto a la posibilidad de despreciar la resistencia de los elementos. Por ejemplo, en [1] indican que es posible despreciar las resistencias en los estudios de fallas, porque «no es probable que influyan significativamente en el nivel de la corriente de falla».

En [4] se presenta un conjunto de suposiciones para el cálculo de cortocircuito, donde sugieren despreciar todas las resistencias de los elementos (generadores, transformadores y líneas de transmisión) para simplificar el cálculo.

Otros trabajos [5], [6] establecen como un error máximo de 5 % para el valor de la corriente de cortocircuito si se desprecia la resistencia de los elementos del sistema. Esta sugerencia se deriva a partir de la expresión general para determinar de la corriente de falla, ver Ecuación (1):

$$|I_{cc}| = \frac{|V_{falla}|}{|R_{falla} + jX_{falla}|} = \frac{|V_{falla}|}{X_{falla} \times \sqrt{1 + \left(\frac{R_{falla}}{X_{falla}}\right)^2}} \quad (1)$$

Donde:

I_{cc} = Corriente de cortocircuito (A)
V_{falla} = Tensión prefalla (V)
R_{falla} = Resistencia en el punto de falla (Ω)
X_{falla} = Reactancia en el punto de falla (Ω)

Donde la R_{falla} y X_{falla} corresponden a la impedancia de Thevenin equivalente en el punto de falla. Cuando la relación X/R es mayor a 4, el error que se comete al despreciar la resistencia es menor al 4 %. Esto es válido excepto para sistemas de distribución o industriales donde esta relación es menor que 4 [6].

En los sistemas de potencia, el valor de la resistencia de los elementos suele ser muy pequeño comparativamente con el de su reactancia. Esta consideración es la razón en la cual se basan las normas y los autores para despreciar las resistencias y su influencia en la determinación de las corrientes de falla. En sistemas de potencia reales, la relación X/R entre la reactancia y la resistencia en el punto de falla suele ser del orden de entre 15 y 120 veces [7].

Las referencias concuerdan en que puede despreciarse la resistencia eléctrica en los análisis de cortocircuito, pero no hay un consenso en cuanto a su efecto en las magnitudes de las corrientes de cortocircuito.

En este trabajo, para dos redes de la literatura, se cuantifica el efecto de variar la resistencia, en el valor de la corriente de cortocircuito, mediante el análisis de sensibilidad (AS). Adicionalmente, se define la relación de estas variaciones con el resto de parámetros que permiten determinar la corriente de cortocircuito (tensión y reactancia eléctrica de los elementos). El análisis se basa en el uso de la teoría de AS y AI, como resultado de estos se llega en forma directa a la misma conclusión presentada en la literatura, pero desde una perspectiva diferente.

La estructura del trabajo es como sigue: la primera sección presenta algunas definiciones fundamentales asociadas al análisis de sensibilidad; la segunda describe el procedimiento para la determinación de la incertidumbre asociada a la corriente de cortocircuito y los sistemas eléctricos de potencia de prueba; la tercera presenta y comenta los resultados obtenidos y, finalmente, la cuarta presenta las conclusiones y trabajos futuros.

1.1. Análisis de sensibilidad e incertidumbre

El análisis de incertidumbre (AI), de acuerdo con [8], se define como el estudio de cuánta incertidumbre en la salida de un modelo aportan las diferentes fuentes de incertidumbre de la entrada. Por otra parte, el análisis de sensibilidad (AS) evalúa la importancia de las variables de entrada de un modelo. Dicha importancia se mide en función de cuánta variabilidad de la salida del modelo es debida a la variabilidad de las variables de entrada. En este caso, la incertidumbre de las variables de entrada es modelada a través de funciones de distribución, de parámetros conocidos.

De acuerdo con [8], se definen los pasos para realizar el enfoque de AS/AI:

- Establecer el objetivo de análisis y en consecuencia definir la forma de la o las salidas del modelo.
- Decidir qué factores de entrada se quieren incluir en el análisis.
- Elegir una función de distribución de probabilidad para cada uno de los factores de entrada.
- Elegir un método de AS, de acuerdo con las características del problema a estudiar.
- Generar la muestra de los factores de entrada. La muestra es generada según las especificaciones de los parámetros conocidos y el tamaño de muestra seleccionado.
- Evaluar la muestra generada en el modelo y producir la o las salidas del mismo, que contiene los valores según la forma especificada en el paso 1.
- Analizar las salidas del modelo, determinar los índices de sensibilidad (importancia) y establecer las conclusiones.

Los métodos de AS pueden clasificarse según la salida de sus medidas: cuantitativos o cualitativos, locales (no permiten variar todos los factores simultáneamente) o globales (permiten variar todos los factores simultáneamente) y dependientes o independientes del modelo [9].

Dado un modelo $Y = F(X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n)$ donde Y es la salida del mismo y X_i representan las variables de entrada modeladas como variables aleatorias (es decir, su incertidumbre es modelada como una función de densidad de probabilidades (fdp)), la varianza $V(Y)$ de la salida Y puede ser descrita como en la Ecuación (2) [8]:

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_i \sum_{j>i} V_{ij} + \sum_i \sum_{j>i} \sum_{l>j} V_{ijl} + \cdots V_{12\ldots k} \tag{2}$$

Donde:

$V_i = V(E(YlX_i))$ es el efecto principal (o de primer orden) debido a x_i
$V_{ij} = V(E(YlX_i, X_j)) - V_i - V_j$ es el efecto de segundo orden producto de la interacción entre x_i y x_j, y así sucesivamente.

Los efectos de sensibilidad principal (S_i), y total (S_{Ti}) pueden definirse como sigue en las ecuaciones (3) y (4), respectivamente, según [8]:

$$S_i = \frac{V_i(E_{-i}(Y|X_i))}{V(Y)} \tag{3}$$

$$S_{Ti} = \frac{E_{-i}(V_i(Y|X_{-i}))}{V(Y)} \tag{4}$$

Donde:

$X_{-i} = (x_1, x_2, \ldots x_{i-1}, x_{i+1}, ..., x_k)$ y $E_{-i}(Y \mid X_i)$ es el valor esperado de Y condicionado a x_i, y, por tanto, es una función de x_i solamente.

El índice principal S_i es la fracción de la varianza de la salida $V(Y)$ que puede atribuirse únicamente a x_i, mientras que S_{Ti} corresponde a la fracción de $V(Y)$ que puede atribuirse a x_i, incluyendo todas sus interacciones con las demás variables de entrada.

El índice principal de S_i es la medida empleada para determinar las variables de entrada que mayoritariamente afectan la incertidumbre de salida, mientras que S_{Ti} se utiliza para identificar el subconjunto de variables de entrada no influyentes, es decir, aquellas variables que pueden ser fijadas en cualquier valor dentro de su rango de incertidumbre, y no afectan significativamente la varianza de salida [10].

Las estimaciones de S_i y S_{Ti} se aproximan: 1) suponiendo independencia (estadística) entre las variables de entrada; 2) usando técnicas de muestreo particulares para generar muestras de las variables de entrada; y 3) evaluando el conjunto de las muestras obtenidas en 2) a partir del modelo en estudio [8].

Existen diversas técnicas para análisis de sensibilidad basadas en la descomposición de la varianza, se mencionan diversas de estas en [10]. Estas técnicas difieren en cuanto a la complejidad computacional, así como en los efectos que evalúan (principales y/o totales). Entre estas técnicas, cabe destacar: Sobol [11] que permite evaluar los efectos principales y totales, y EFAST (*Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*) [12], una extensión de FAST (*Fourier Amplitude Sensitivity Test*) [13] que también evalúa los efectos principales y totales (S_i y S_{Ti}) pero con menor complejidad computacional que el método de Sobol.

2. Metodología

Para estimar el efecto de la resistencia eléctrica de los elementos (variables de entrada del modelo) sobre la corriente de cortocircuito (salida del modelo), se propone el siguiente enfoque:

- Se modelan todos los elementos que componen el sistema de potencia para el cálculo de cortocircuito.
- Se determina el valor base de la corriente de cortocircuito, a partir de los valores dados de los elementos del sistema de potencia.
- Se perturban las variables de entrada (tensión prefalla, resistencia e impedancia de los elementos del sistema de potencia), suponiendo una distribución de probabilidad conocida para las mismas ($x_i \pm \Delta x_i$).

- Aplicando el método EFAST [12], se determinan los efectos principales y totales en la salida (corriente de cortocircuito) producto de las perturbaciones de las entradas.

Se supone para las variables de entrada (tensión prefalla, resistencia y reactancia de los elementos del sistema de potencia) una distribución uniforme: $U[0-1,2\times valor\ base]$. La distribución es asimétrica y permite cuantificar el efecto de despreciar (valores cercanos a cero) la resistencia de los elementos del sistema de potencia.

Posterior a la evaluación del procedimiento descrito (AS), se realiza una simulación de Monte Carlo [14] considerando únicamente las variables de interés (resistencia eléctrica de los elementos). La simulación de Monte Carlo es un método que se emplea para evaluar la propagación de incertidumbre a través de la generación de variables aleatorias. De esta manera, se cuantifica la propagación de la incertidumbre a la salida del modelo, es decir, cuantifica la variación de la magnitud de la corriente de cortocircuito.

El cálculo de cortocircuito y el AS/AI se realizaron en el *software* libre R [15], para el AS se utilizaron específicamente los algoritmos de la librería *Sensitivity*.

2.1. Sistemas eléctricos de prueba

2.1.1. Sistema de potencia de prueba 1 (SEP1)

El sistema de potencia empleado [16] es una red eléctrica no mallada con dos fuentes, como muestra la Figura 1. Está compuesto por un sistema externo, dos líneas de transmisión, un transformador y un generador. Se asume una falla trifásica sólida a tierra en $k3$.

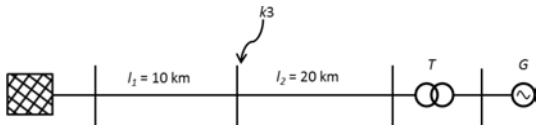


Figura 1. Sistema de potencia de prueba radial (SEP1)

Se modelan los elementos del sistema de potencia de prueba radial (SEP1), los valores se muestran en la Tabla 1. Estos valores representan las variables de entrada del modelo de AS.

Tabla 1. Impedancia de los elementos del sistema de potencia de prueba 1 (SEP1)

N.º	Variable	Valor
1	Tensión prefalla	110 kV
2	Resistencia sistema externo	0,605 Ω
3	Reactancia sistema externo	6,050 Ω
4	Resistencia línea 1	1,930 Ω
5	Reactancia línea 1	3,860 Ω
6	Resistencia generador	8,879 Ω
7	Reactancia generador	126,762 Ω
8	Resistencia transformador	2,710 Ω
9	Reactancia transformador	53,171 Ω
10	Resistencia línea 2	2,440 Ω
11	Reactancia línea 2	7,440 Ω

2.1.2. Sistema de potencia de prueba 2 (SEP2)

La red eléctrica mallada tomada de [16], para la cual se supone una falla monofásica sólida a tierra en $k1$ (ver Figura 2). Los valores de los elementos se muestran en la Tabla 2, estos son los factores de entrada para el análisis de sensibilidad.

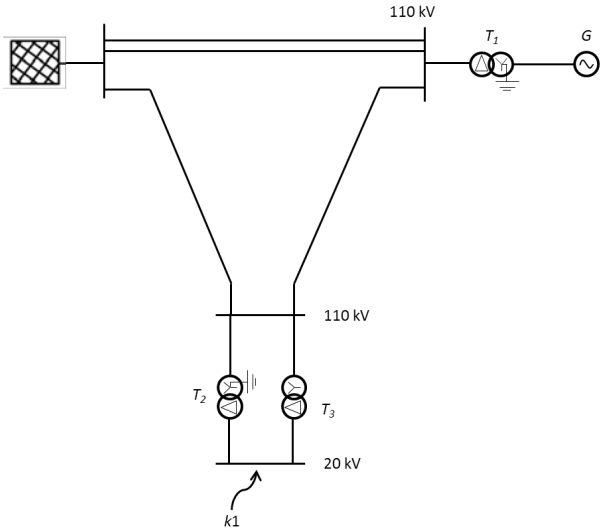


Figura 2. Sistema de potencia de prueba mallado (SEP2)

Por ser una falla monofásica se resuelve mediante el método de las redes de secuencia [1], y los elementos deben modelarse con sus valores correspondientes de secuencia positiva, negativa y cero. Es decir, los parámetros que intervienen en el AS se incrementan por 3. Para una línea, por ejemplo, se tendrá una resistencia de secuencia positiva, negativa y cero.

Tabla 2. Impedancia de los elementos del sistema de potencia de prueba 2 (SEP2)

N.º	Variable	Valor	Nº	Variable	Valor
1	Tensión Prefalla	20 kV	24	Resist. Línea 3_0	0,161 Ω
2	Resist. Sistema Externo_0	0,030 Ω	25	React. Línea 3_0	0,648 Ω
3	React. Sistema Externo_0	0,300 Ω	26	Resist. Línea 3_+	0,061 Ω
4	Resist. Sistema Externo_+	0,020 Ω	27	React. Línea 3_+	0,199 Ω
5	React. Sistema Externo_+	0,200 Ω	28	Resist. Línea 3_-	0,061 Ω
6	Resist. Sistema Externo_-	0,020 Ω	29	React. Línea 3_-	0,199 Ω
7	React. Sistema Externo_-	0,200 Ω	30	Resist. Transf. 1_0	0,147 Ω
8	Resist. Generador_+	0,224 Ω	31	React. Transf. 1_0	2,746 Ω
9	React. Generador_+	3,200 Ω	32	Resist. Transf. 1_+	0,147 Ω
10	Resist. Generador_-	0,224 Ω	33	React. Transf. 1_+	2,746 Ω
11	React. Generador_-	4,800 Ω	34	Resist. Transf. 1_-	0,147 Ω
12	Resist. Línea 1_0	0,084 Ω	35	React. Transf. 1_-	2,746 Ω
13	React. Línea 1_0	0,374 Ω	36	Resist. Transf. 2_0	0,027 Ω
14	Resist. Línea 1_+	0,016 Ω	37	React. Transf. 2_0	0,761 Ω
15	React. Línea 1_+	0,064 Ω	38	Resist. Transf. 2_+	0,027 Ω
16	Resist. Línea 1_-	0,016 Ω	39	React. Transf. 2_+	0,761 Ω
17	React. Línea 1_-	0,064 Ω	40	Resist. Transf. 2_-	0,027 Ω
18	Resist. Línea 2_0	0,161 Ω	41	React. Transf. 2_-	0,761 Ω
19	React. Línea 2_0	0,648 Ω	42	Resist. Transf. 3_+	0,027 Ω
20	Resist. Línea 2_+	0,061 Ω	43	React. Transf. 3_+	0,761 Ω
21	React. Línea 2_+	0,199 Ω	44	Resist. Transf. 3_-	0,027 Ω
22	Resist. Línea 2_-	0,061 Ω	45	React. Transf. 3_-	0,761 Ω
23	React. Línea 2_-	0,199 Ω			

Nota: Los símbolos +, -, 0 indican los valores de secuencia positiva, negativa y cero correspondientemente.

3. Resultados

3.1. Sistema de potencia de prueba 1 (SEP1)

En la Figura 3 se muestran los índices de sensibilidad de primer orden (S_i) (sección blanca de las barras) y total (S_{Ti}) (la sección completa, blanca y gris) para el SEP1. Las variables que más afectan la corriente de cortocircuito, en orden de importancia, son: la tensión prefalla ($S_1 = 0,456$), la reactancia del sistema externo ($S_3 = 0,252$) y la reactancia de la línea 1 ($S_5 = 0,108$). El resto de los factores, incluyendo las resistencias de los elementos, tiene valores de importancia S_{Ti} muy pequeños, por lo que sus efectos se pueden considerar despreciables.

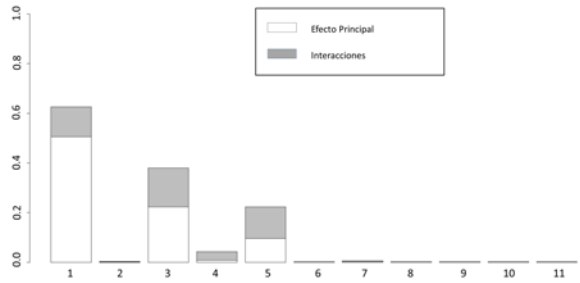


Figura 3. Efectos principales (S_i) y totales (S_{Ti}) de las variables de entrada en la corriente de cortocircuito del SEP1

Como se mencionó, la tensión prefalla tiene una importancia muy alta (0,456), por esto, posteriormente se la fija como constante en el modelo, para evaluar únicamente los efectos de las reactancias y resistencias de los elementos, de igual manera se obtuvieron efectos muy pequeños para las resistencias.

A manera de comparación, se agruparon todos los efectos principales de las resistencias y los efectos principales de las reactancias menos importantes, ver Figura 4, manteniendo constante la tensión prefalla. La sumatoria del efecto principal de las resistencias es despreciable frente a la suma del efecto principal de las reactancias; en este sistema y, para esta falla particular, la variable más importante es la reactancia del sistema externo.

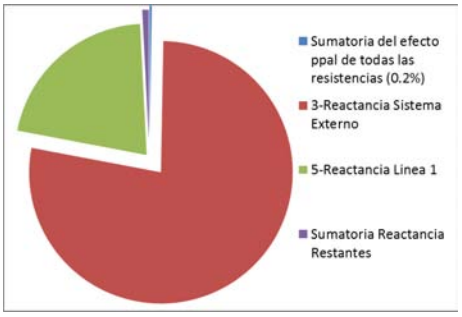


Figura 4. Efectos principales de las reactancias y la sumatoria de los efectos principales de las resistencias

Posterior a la evaluación del AS, y considerando solo las resistencias de los elementos, se realiza la evaluación del método Monte Carlo [14], donde se obtiene la distribución de probabilidad aproximada de la corriente de cortocircuito para 5000 evaluaciones. La corriente de cortocircuito para los valores de la Tabla 1 es de 7196 A, lo cual corresponde con el valor normalizado de 1 unidad, en el histograma aproximado de la corriente de cortocircuito presentado en la Figura 5. Los valores mínimos y máximos obtenidos, para la corriente de cortocircuito, fueron de 0,995 y 1,031 veces. El valor promedio de esa distribución es de 1,022, la forma de la distribución es asimétrica, con una tendencia al extremo superior.

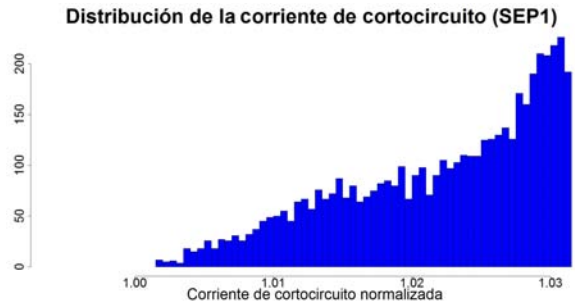


Figura 5. Histograma aproximado de la corriente de cortocircuito (SEP1)

En la literatura se refiere a la relación X/R para despreciar la resistencia eléctrica en los cálculos de cortocircuito, por esto en la Figura 6 se muestra la corriente de cortocircuito normalizada para los valores X/R obtenidos en la simulación de Monte Carlo.

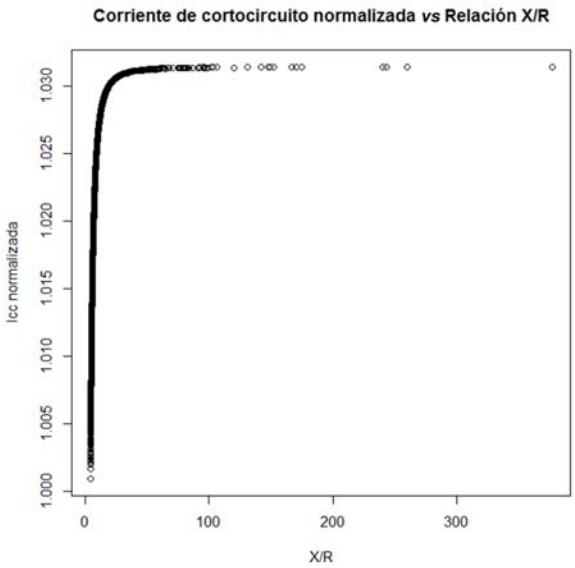


Figura 6. Corriente de cortocircuito normalizada para los valores X/R (SEP1)

Los valores de la relación X/R varían desde aproximadamente 4 hasta 400, considerando en este amplio rango, la corriente de cortocircuito normalizada no presenta variaciones que alcancen un 4 % cuando menos.

3.2. Sistema de potencia de prueba 2 (SEP2)

Para el sistema de potencia mallado SEP2 se obtienen resultados similares al SEP1. La tensión prefalla resulta ser la variable más importante (ver Figura 7). En este sistema existe más incertidumbre de orden superior asociada a la interacción de las variables (S_{Ti} - S_i), esto es debido al hecho que el sistema es mallado, y para obtener la impedancia equivalente de cortocircuito deben calcularse varias impedancias equivalentes (sumas y productos sucesivos).

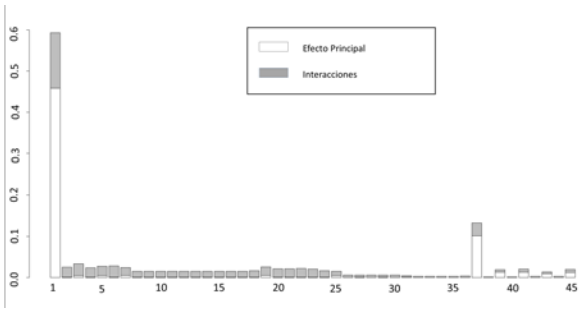


Figura 7. Efectos principales ($_{Si}$) y totales (S_{Ti}) de las variables de entrada en la corriente de cortocircuito del SEP2

Los números de las variables (eje x) de la Figura 7, están en concordancia con la numeración de la Tabla 2. Nótese que la variable 37 (reactancia de secuencia del transformador 2 aparece como segunda variable importante, si bien con una contribución muy pequeña).

En la Figura 8 se comparan la suma de los índices totales de las resistencias y de las reactancias del sistema SEP2, considerando constante la tensión prefalla, el porcentaje que representa el índice de la suma de las resistencias es de un poco menos del 7 %.

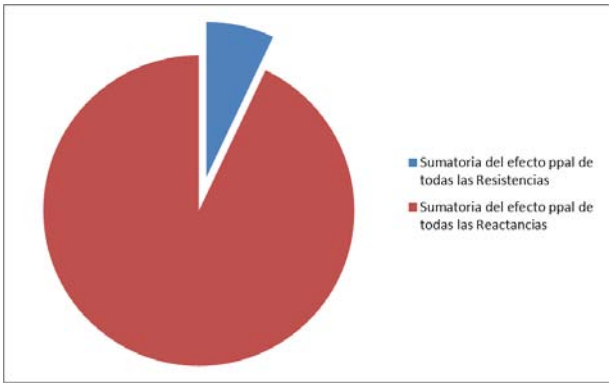


Figura 8. Sumatoria de los efectos principales de las resistencias y reactancias del SEP2

La Figura 9 muestra el histograma aproximado para la corriente de cortocircuito, obtenido mediante la técnica de Monte Carlo perturbando solamente las resistencias de los elementos del sistema SEP2. Esta corriente para los valores de la Tabla 2 es de 13 679 A, lo cual corresponde con el valor normalizado de 1 unidad, en el histograma de la Figura 9. Los valores mínimos y máximos obtenidos, para la corriente de cortocircuito, fueron de 0,9999 y 1,0037. Nótese como realizando variaciones en las resistencias, el efecto sobre la corriente de cortocircuito es despreciable. Esta distribución es más simétrica que la del ejemplo anterior y tiene un valor promedio de 1,002.

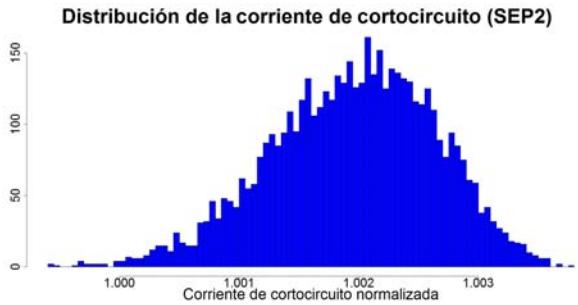


Figura 9. Histograma aproximado de la corriente de cortocircuito (SEP2)

La Figura 10 muestra la corriente de cortocircuito normalizada para los valores X/R obtenidos en la simulación de Monte Carlo para el sistema SEP2. En este caso la variación es mucho menor, la corriente de cortocircuito normalizada no presenta variaciones que alcancen un 1 %.

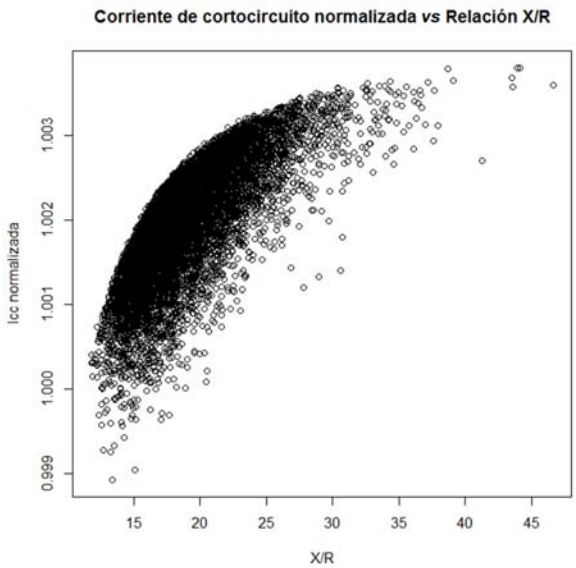


Figura 10. Corriente de cortocircuito normalizada para los valores X/R (SEP2)

4. Conclusiones

En este trabajo se estima la incertidumbre de la corriente de cortocircuito debida a la resistencia eléctrica de los elementos, a partir de un enfoque de sensibilidad e incertidumbre. Este análisis puede aplicarse a cualquier otro sistema de potencia con cualquier ubicación y/o tipo de falla.

Para los dos casos considerados, los resultados están en concordancia con lo que sugieren diversos autores: es posible despreciar la resistencia de los elementos, siempre que la reactancia sea mucho mayor que la resistencia de los mismos (relación X/R), la variación de la magnitud de la corriente de cortocircuito en los dos casos evaluados, no supera un 4 %, esto coincide con el valor de 4-5 % reportado en algunos trabajos consultados [5, 6].

Este análisis no solo considera la incertidumbre de la corriente de cortocircuito, debido a las incertidumbres de las resistencias y reactancias, sino que permite cuantificar de la variación total, es decir, el porcentaje debido a la incertidumbre de las resistencias de los componentes del SEP. En estos dos casos, el efecto de la resistencia de los elementos es aproximadamente un 7 % (en sistema de potencia de prueba 2 (SEP2)), el resto está asociado a las reactancias, si se considera constante el valor de la tensión prefalla, para el análisis de sensibilidad realizado.

Los resultados obtenidos en estos dos sistemas, pudieran ser extrapolables a sistemas de potencia reales en media o alta tensión, ya que en estos la reactancia suele ser mucho mayor que la resistencia ($X \ggg R$). Se pretende como trabajo futuro establecer relaciones y/o valores críticos entre el factor reactancia-resistencia (X/R) del punto de falla del sistema y los índices principales (S_i) de la incertidumbre de la corriente de cortocircuito.

Referencias

[1] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia.* Mc Graw Hill, 1996. [Online]. Available: https://bit.ly/3bsZqDF

[2] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, 1994. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1994.121642

[3] IEC, *IEC Short-circuit currents in three-phase A. C. systems: Part 0: Calculation of currents / Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents,*, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/2WUfBEF

[4] J. Glover and M. Sarma, *Sistemas de potencia: análisis y diseño.* International

Thomson Editores, 2003. [Online]. Available: https://bit.ly/2WOIW3s

[5] R. Gil Bernal, *Estudios en sistema de potencia*, 2000. [Online]. Available: https://bit.ly/2Z27ZD4

[6] F. M. González-Longatt, *Cortocircuito simétrico*, 2007. [Online]. Available: https://bit.ly/3dGVpgn

[7] IEEE, *IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers > 1000 Vac Rated on a Symmetrical Current Basis*, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7906465

[8] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, *Sensitivity analysis in practice.* John Wiley and Sons, Ltd, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/2LD6oM5

[9] V. Schwieger, "Variance-based sensitivity analysis for model evaluation in engineering surveys," *INGEO 2004 and FIG Regional central and Eastern European conference on engineering surveying, Bratislava, Slovakia*, 01 2004. [Online]. Available: https://bit.ly/3cw8IQy

[10] S. Tarantola, "Variance-based methods for sensitivity analysis," *Int. Conf. on Sensitivity Analysis of Model Output. Joint Research Center of the European Commission*, 2002. [Online]. Available: https://bit.ly/2y3Rzim

[11] I. M. Sobol, "Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models," *Mathematical modelling and computational experiments*, vol. 1, no. 4, pp. 407–414, 1993. [Online]. Available: https://bit.ly/2Lq0M7F

[12] A. Saltelli, S. Tarantola, and K. P. S. Chan, "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output," *Technometrics*, vol. 41, no. 1, pp. 39–56, 2012. [Online]. Available: https://bit.ly/2Z28H2P

[13] R. I. Cukier, C. M. Fortuin, K. E. Shuler, A. G. Petschek, and J. H. Schaibly, "Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. i theory," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 59, no. 8, pp. 3873–3878, 1973. [Online]. Available: https://doi.org/10.1063/1.1680571

[14] M. G. Morgan and M. Henrion, *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis.* Cambridge University Press, 1990. [Online]. Available: https://bit.ly/2YZpJ1D

[15] The R Development Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3dMHNQV

[16] M. Eremia and M. Shahidehpour, *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control.* John Wiley and Sons, 2013. [Online]. Available: http://doi.org/10.1002/9781118516072

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.02
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Humedad y su relación con la espectroscopía dieléctrica en agregados de concreto

Moisture in Concrete Aggregates and its relation to the Dielectric Constant

Franco Abanto[1,*], Pedro Rotta[1], Luis LaMadrid[1], Juan Soto[1], Gerson La Rosa[1], José Manrique[1], Gaby Ruiz[1], William Ipanaque[1]

Resumen

Medir el contenido de humedad (CH) de los agregados de concreto (ADC) en la fabricación de concreto premezclado es uno de los retos en la industria de la construcción porque afecta a las propiedades finales del concreto. Actualmente los métodos que se utilizan para medir el CH en ADC son invasivos y destructivos. Este artículo presenta una técnica moderna basada en espectroscopía dieléctrica (ED), un método que al propagar microondas en el material correlaciona su constante dieléctrica (CD) y su CH. En esta investigación se ha utilizado este método en ADC. Tres diferentes canteras peruanas de ADC (Moyobamba, Sol-Sol y Cerro Mocho) han sido utilizadas. Los resultados demuestran que el sensor a una frecuencia de 1.5 GHz es capaz de detectar el CH en ADC con una regresión lineal de $R^2 = 95$ %. En conclusión, se puede utilizar la ED como un método de sensado no invasivo y en línea de CH en ADC para ser utilizado en la industria de la construcción.

Palabras clave: contenido de humedad, microondas, espectroscopía dieléctrica, constante dieléctrica, agregados de concreto

Abstract

Measurement of moisture content (CH) of concrete aggregates (AOC) in the manufactury of ready mixed concrete is one of the currently challenges in the building industry since affect to the final properties of concret. At present, the methods for measurement of CH in AOC are invasive and destructive. This paper presents a novel sensing technique using dielectric espectroscopy (ED), a method that using the propagation of microwaves on the material allows the correlation of its dielectric constant (CD) and its CH. In this research is used this method in AOC. Three diferents peruvian quarries (Moyobamba, Sol sol y Cerro Mocho) have been used. The results shows that the sensor at the frequency of 1.5GHz is capable of detecting the CH in AOC with linear regression of $R^2 = 95\%$. In conclusion, is available using the ED as a online and no invasive sensing method of CH in AOC for using in the building industry.

Keywords: moisture contentent, microwaves, dielectric spectroscopy, dielectric contant, concrete aggregates.

[1,*]Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control, Universidad de Piura, Perú.
Autor para correspondencia ✉: fabanto977@hotmail.es.
https://orcid.org/0000-0002-9388-2692 https://orcid.org/0000-0002-6439-2870
https://orcid.org/0000-0002-4293-8086 https://orcid.org/0000-0001-9157-3098
https://orcid.org/0000-0001-6829-2706 https://orcid.org/0000-0002-0331-2734
https://orcid.org/0000-0003-3835-9708 https://orcid.org/0000-0003-4039-4422

Recibido: 14-10-2019, aprobado tras revisión: 13-04-2020

Forma sugerida de citación: Abanto, F.; Rotta, P.; LaMadrid, L.; Soto, J.; La Rosa, G.; Manrique, J.; Ruiz, G. y Ipanaque, W. (2020). «Humedad y su relación con la espectroscopía dieléctrica en agregados de concreto». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 17-27. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.02.

1. Introducción

El contenido de humedad (CH) de un material es un parámetro que muchos sectores industriales buscan controlar en sus procesos, pues repercute en las características finales del producto. En la industria de la construcción, el CH del concreto resulta importante porque define las propiedades mecánicas y la vida útil de un proyecto civil [1]. Se han realizado estudios para analizar la durabilidad y resistencia en estructuras de concreto midiendo el CH [2] y también en probetas de concreto [3], no se han realizado investigaciones de sistemas que midan el CH de ADC en línea con el proceso de mezclado en planta. Autores en [4–6] muestran diferentes técnicas para lograr la medición del CH de materiales. En el presente artículo se utiliza una metodología basada en espectroscopía dieléctrica (ED) que ha sido probada en suelo [7], lana [8], papel [9], tela [10], harina [11], madera [12–14].

Existen varios métodos de medición de CH de materiales que se clasifican en directos e indirectos. En los métodos directos se obtiene el CH sin correlacionar con otras variables. Estos son los métodos termogavimétrico y químico. El método termogavimétrico no es selectivo [15, 16], el rango eficaz de medición varía de 0.5 % a 99.9 % para el CH, y su exactitud es de 0.5 % de la masa total. En contraste, el método químico [17–19] es selectivo, tiene una precisión de 0.0001 % y un rango de medición de 0.00001 a 99.9 % de CH.

Los métodos indirectos requieren una calibración previa para obtener el CH usando métodos directos. Los indirectos se clasifican en pasivos y activos. Los primeros utilizan elementos como resistencias o capacitancias variables para determinar la CH, y por su naturaleza es un control invasivo. Los activos son aquellos que emiten ondas electromagnéticas para determinar las características del medio, garantizando de esta manera un control en línea, y la integridad de la muestra al no ser invasivo ni destructivo.

Los resultados de las diversas investigaciones en [20–23] dentro del campo de los métodos activos, demuestra, una relación existente entre el CH y la permitividad relativa (ε') o constante dieléctrica (CD) [24] de un material.

Los métodos indirectos usan técnicas como la ED que busca medir la CD del material y también se utiliza para otros fines como caracterizar materiales. Otra técnica indirecta es el uso de imágenes hiperespectrales que ha tenido buen éxito en bioingeniería [25] y en agroindustria [26–29].

Autores muestran aplicaciones con ED orientadas a la agricultura con el fin de estimar la calidad de sus productos [30–41], así tenemos aplicaciones en semillas, trigo, granos, nueces, frutos de palma aceitera, plátanos.

Este artículo describe conceptos teóricos de la ED y su relación con el CH [6]. Se presenta una aplicación de la ED para buscar la correlación entre el CH y la CD en ADC con diferentes canteras y verificar la posibilidad de este nuevo método en esta industria.

1.1. Descripción de las ondas electromagnéticas

Se denomina campos electromagnéticos al conjunto de campos de fuerzas eléctricas y magnéticas producidas por cargas y corrientes eléctricas en movimiento a través del vacío o algún tipo de materia. Cuando un campo electromagnético se propaga en el espacio se denomina propagación de ondas electromagnéticas.

La propagación de ondas electromagnéticas encuentra su fundamento en la solución de las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times \overline{E} = \overline{M} - \frac{\partial \overline{B}}{\partial t} \ (ley\ de\ Faraday) \tag{1}$$

$$\nabla \times \overline{H} = \overline{J} - \frac{\partial \overline{D}}{\partial t} \ (ley\ de\ Ampere) \tag{2}$$

$$V.\overline{D} = \rho \ (Ley\ de\ Gauss) \tag{3}$$

$$V.\overline{H} = 0 \ (Ley\ de\ Gauss) \tag{4}$$

Donde:

E es el campo eléctrico [V/m]
H es el campo magnético [A/m]
M es la densidad de corriente magnética [V/m^2]
J es la densidad de corriente eléctrica [A/m^2]
B es la densidad de flujo magnético [Wb/m^2]
D es la densidad de flujo eléctrico [Coul/m^2]
ρ es la densidad de carga [Coul/m^3]

Para resolver las ecuaciones de Maxwell se supone propagación en el espacio libre y, además, un campo senoidal y armónico dependiente del tiempo, que se propague en el eje z y polarizado en el eje x.

Al utilizar estas suposiciones y combinar las ecuaciones dadas se genera una ecuación de segundo orden que se conoce como ecuación vectorial homogénea de Helmholtz para E.

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \tag{5}$$

Donde k es el número de onda que para un medio sin pérdida y se expresa como:

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{rad}{min}\right) \tag{6}$$

Donde:

ω es la frecuencia angular de propagación
ε_0 es la permitividad del vacío
μ_0 es la permeabilidad del vacío

Resolviendo:

$$\overline{E}(z,t) = \overline{a_x}\varepsilon_0 cos(\omega t - kz) \tag{7}$$

que toma el valor fasorial:

$$\overline{\varepsilon}(z) = \overline{a_x}\varepsilon_0 e^{-jkz} \tag{8}$$

Para expresar de forma senoidal, el vector fasorial se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\overline{E}(z,t) = Re\{\overline{\varepsilon}(z)e^{j\omega t}\} \tag{9}$$

En la Figura 1 se puede observar la propagación del campo eléctrico en el espacio libre, en donde se han tomado las hipótesis dadas.

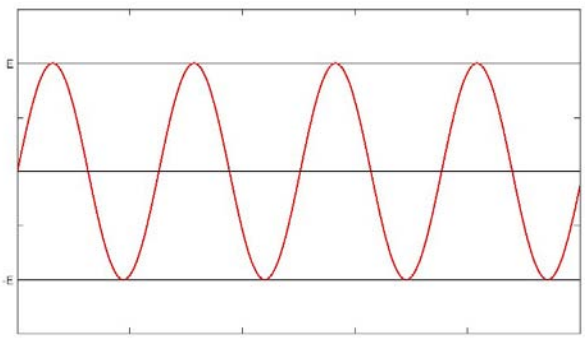


Figura 1. Representación de una onda electromagnética que viaja en el espacio libre [11]

1.2. Propagación de las ondas en un medio con pérdidas

Las hipótesis definidas en el apartado anterior consideran la propagación de ondas electromagnéticas en el vacío. Se amplían a materiales con pérdidas, es decir, materiales convencionales.

Los materiales se clasifican según su comportamiento frente a campos como buenos conductores cuando permiten el paso de campos eléctricos por ellos o como dieléctricos cuando almacenan energía eléctrica en su interior y forman enlaces moleculares polares que se conocen como dipolos eléctricos. Normalmente, un material tiene una parte conductora y otra dieléctrica. Su comportamiento se determina mediante la permitividad compleja del material, que se define como:

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{10}$$

Donde ε' es la constante dieléctrica del material y mide la cantidad de momentos dipolares formados y representa la energía contenida en el material y ε'' es la constante de pérdidas que representa la energía que no es almacenada en el material, sino que de alguna manera se propaga o refleja y se representa como:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_r + \frac{\sigma}{\omega} \tag{11}$$

Donde σ es la conductividad del material tal que:

$$\overline{J} = \sigma\overline{E} \tag{12}$$

Se obtiene una conductividad equivalente que representa todas las pérdidas en el medio.

$$\sigma_{eq} = \omega\varepsilon'' \tag{13}$$

La «tangente de pérdidas» es una medida de la pérdida de potencia en el medio y se define.

$$tan\ \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\omega\varepsilon'' + \sigma}{\omega\varepsilon'} \tag{14}$$

Por lo tanto, la solución de las ecuaciones de Maxwell a través de la ecuación vectorial homogénea de Helmholtz para E queda de la forma:

$$\nabla^2\overrightarrow{E} + k_c^2\overrightarrow{E} = 0 \tag{15}$$

$$k_c = \omega\sqrt{\varepsilon_c\mu}(m^{-1}) \tag{16}$$

Donde k_c es el número de onda complejo, es decir, que toma el valor complejo de la permitividad del medio que se comporta de modo fasorial al tomar un campo eléctrico senoidal. Además, la permitividad del vacío queda expresada como un valor real, ya que no tendrá pérdidas:

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\frac{F}{m}$$

Por lo tanto, esta forma de comportamiento de los materiales hace que las ondas electromagnéticas se atenúen al momento de incidir en ellas, parte de la energía será almacenada en los enlaces polares y parte se irá en pérdidas de energía. Esto hace que se defina el concepto de constante de propagación como:

$$y = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{17}$$

Usando la definición de pérdida tangencial.

$$y = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

Donde α es la constante de atenuación y β es la constante de fase.

Entonces la solución primaria que se da en el vacío queda como:

$$\overline{E}(z,t) = \overline{a_x}\varepsilon_0 cos(\omega t - \beta z) \tag{19}$$

que toma el valor fasorial:

$$\overline{\varepsilon}(z) = \overline{a_x}\varepsilon_0 e^{-j\beta z} \tag{20}$$

Donde:

$$\overline{E}(z,t) = Re\{\overline{\varepsilon}(z)e^{j\omega t}\} \tag{21}$$

En la Figura 2 se muestra la representación de esta atenuación de un campo eléctrico que incide en un material con pérdidas.

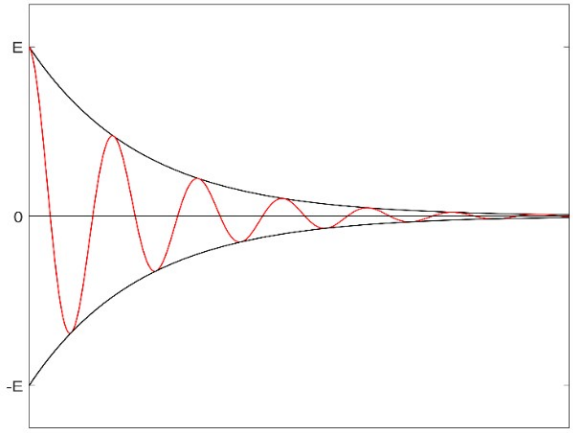


Figura 2. Representación de un campo eléctrico que viaja en un medio con pérdidas [11]

La energía perdida al momento de la propagación sobre el material, recibe ese nombre porque no se almacena en el material formando enlaces polares, parte de esta energía se refleja del material y parte de ella atraviesa el material, de acuerdo con el valor de conductividad de este. Esto se aprecia en la Figura 3. Se observa un campo eléctrico incidente de verde que al chocar en el medio (de rayas azules) se refleja parte del campo (de rojo) y parte se propaga por el campo (de naranja).

Todo esto queda cuantificado en la permitividad compleja.

En todo este análisis se asume que el material es isotrópico, es decir, que los momentos dipolares o que los enlaces polares se dan en la dirección del campo eléctrico, en materiales anisotrópicos esto no ocurre, pero este análisis no se toma en cuenta para esta investigación ya que hemos considerado a los ADC isotrópicos.

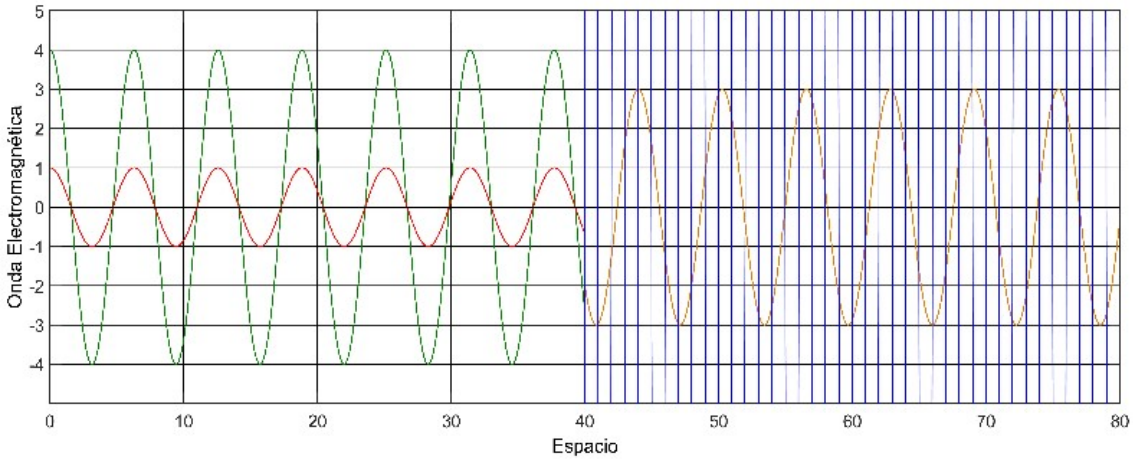


Figura 3. Comportamiento de la propagación de una onda electromagnética frente a un cambio de medio [11]

La parte del campo reflejado se puede relacionar respecto al campo incidente mediante el coeficiente de reflexión Γ que relaciona la onda reflejada y la onda incidente del campo.

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \tag{22}$$

Reemplazando la ecuación de la onda para expresarlo en términos de campo eléctrico, sería:

$$E_r(z) = \Gamma E_0 e^{y_1 z} \alpha_x \tag{23}$$

La ecuación del campo magnético de la onda propagada y reflejada se dirige en la dirección ortogonal al campo eléctrico:

$$H_r(z) = \Gamma \frac{E_0}{n_1} e^{y_1 z}(-a_y) \tag{24}$$

Es posible medir el campo eléctrico incidente en un material, el campo propagado y el campo reflejado de acuerdo con las ecuaciones dadas en la teoría. Con todo esto podemos asumir que es posible deducir los valores de CD que tomará el material al analizar la relaciones entre estas cantidades.

1.3. Propiedades dieléctricas de la molécula de agua

El agua es un dieléctrico, es decir, como hemos visto contiene en su estructura moléculas polares que forman momentos dipolares al estar en contacto con un campo eléctrico y por ende a mayor cantidad de agua, mayor será la CD medida.

Un material seco tendrá un comportamiento establecido según su estructura molecular y será nor-

malmente homogéneo cuando esta estructura se mantenga inalterable al sufrir aumento de temperatura o mezclarse con agua. Los ADC, por su forma y propiedades, presentan una estructura homogénea. Por ende, su constante dieléctrica permanecerá inalterable cuando se humedezca. Sin embargo, a mayor humedad se incrementará el momento dipolar de la mezcla por el agua presente, lo que ocasionará que la CD de la mezcla cambie debido al aumento de agua. Por lo tanto, la CD de la mezcla se verá relacionada con el CH de los ADC y si podemos medir el CH y la CD de la mezcla podemos determinar una correlación entre estas para una futura predicción y utilizarla como sistema de sensado.

2. Metodología

Se ha visto en el apartado anterior que es posible correlacionar el valor del CH de los ADC con la CD de la mezcla ya que la cantidad de momentos dipolares aumentará de acuerdo con su CH. Además, se ha visto teóricamente que es posible determinar la CD de la mezcla utilizando las ecuaciones de Maxwell y su solución para medios con pérdidas. En este apartado se brinda la metodología experimental que se ha seguido para realizar dicha correlación.

Es preciso recalcar que el campo emitido es el campo que choca con el material, y el campo propagado es el que atraviesa el material.

2.1. Materiales

La ED usa frecuencias en el rango de las microondas para la propagación de los campos electromagnéticos, por lo tanto, se utilizan dos antenas de apertura para emitir y recibir los campos incidente y propagado respectivamente. Ver Figura 4.

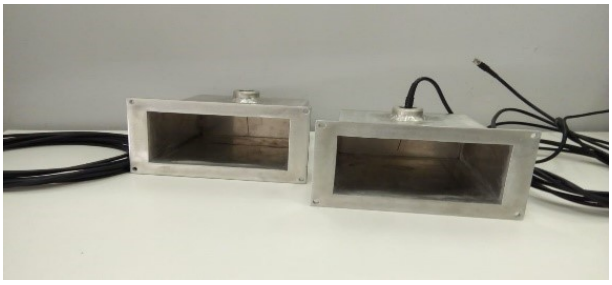


Figura 4. Antenas de apertura utilizadas en pruebas de medición de CH

También se ha utilizado un sistema de análisis de señales vectoriales para emitir el campo electromagnético como se ve en la Figura 5. Se analiza la variación de la fase y amplitud de la señal para posteriormente determinar la CD.

Figura 5. Equipo analizador de señales vectoriales Wavetester

El analizador de señales vectoriales utiliza un *software* para detección de datos.

También se ha construido una plataforma de sensado para realizar la experimentación, sobre la que se ha colocado el ADC para medir su CD y su CH. Otros materiales utilizados han sido: balanzas, recipientes de medición, horno de secado, etc.

La muestra se deposita entre la antena receptora y la transmisora, donde se mide el efecto de la onda sobre los ADC al propagarse en el espacio libre entre las dos antenas.

2.2. Experimentación

Se han utilizado tres canteras peruanas de ADC para realizar la calibración del sistema: Cerro Mocho, Moyobamba y Sol-Sol. Para obtener la correlación CH *vs.* CD se ha proseguido de la siguiente manera:

Se ha definido una masa inicial (m_0) como la masa total de ADC proporcionado por la cantera. Luego se ha realizado un secado termogavimétrico en horno para obtener el valor de masa seca (m_s), esto quiere decir, sin CH. Este valor de m_s se ha dividido en 4, cada una de estas muestras se ha denominado masa seca de muestreo y se han numerado del 1 al 4 (m_{smx}), el x en el subíndice corresponde a la numeración de la submuestra. Se procede a seleccionar la m_{sm1} y se coloca sobre la plataforma de sensado, se emite el campo electromagnético sobre el material y con ayuda del analizador de señales se mide el valor de la CD de la m_{sm1}. Este valor de CD corresponde al valor de 0 % de CH. A este valor de m_{sm1} se le agrega masa de agua (m_{H_2O}) correspondiente a 0.5 %m_{sm1} y se procede a realizar el mismo procedimiento de medición de su CD. Luego se vuelve a añadir 0.5 %m_{sm1} y se mide su CD que corresponde al 1 % de su CH. Este procedimiento se repite hasta que se llega al 10 % de CH.

$$m_{h2O} = 0.005 \times m_{sm1} \tag{25}$$

Se debe aclarar que se cumplen las siguientes relaciones en la experimentación:

$$m_{sm1} = m_{sm2} = m_{sm3} = m_{sm4} \tag{26}$$

$$m_{sm1} + m_{sm2} + m_{sm3} + m_{sm4} = m_s \tag{27}$$

La distancia entre antenas fue de 23 cm, el espesor de la muestra se estableció en 40 mm y la frecuencia de emisión del campo electromagnético fue de 1.5 GHz.

Se utilizaron m_{sm1} y m_{sm2} para realizar las curvas de correlación y m_{sm3} y m_{sm4} para validar los resultados. Cabe resaltar que en todo momento se mide la CD de la mezcla de ADC húmedo.

3. Resultados

Con los valores de CD *vs.* CH obtenidos para cada cantera se ajusta la curva de calibración mediante modelos de regresión lineal. En este ajuste el CH se establece como variable dependiente y la CD como variable independiente con diferentes efectos: lineal, cuadrática, cúbica y de cuarto grado.

Para la selección del modelo de regresión lineal se aplicó el método *Stepwise Forward* para encontrar cuál de los efectos de la CD se ajusta mejor con el CH. Este método clásico para la selección de variables inicia con un modelo vacío y en cada iteración evalúa incorporar algunos de los efectos definidos: lineal, cuadrático, cúbico y de cuarto grado de la constante dieléctrica. Se decide incorporar algunos de los efectos mencionados si cumple el nivel de significancia definido: Valor P menor a 0,05. El método *Stepwise Forward* finaliza cuando no se puede incorporar más efectos por no cumplir el nivel de significancia.

Para evaluar el nivel de significancia de los efectos se realiza una prueba de hipótesis con *T-Student*. En esta prueba se verifica si el coeficiente estimado del efecto es igual o diferente de cero.

$$H_0 : b_i = 0 \tag{28}$$

$$H_1 : b_i \neq 0 \tag{29}$$

Si se rechaza la hipótesis nula ($b_i \neq 0$) el efecto es significativo.

En el contraste de hipótesis se calcula la relación entre el coeficiente estimado del efecto (b_i) y su desviación estándar (S_{b_i}), y se compara con el t crítico para un nivel de confiabilidad de 95 % ($\alpha = 0,05$).

$$\frac{b_i}{S_{bi}} > j_{N-1}^{\alpha/2} \tag{30}$$

Si se cumple la relación se rechaza la hipótesis nula. En esta condición se cumple que el «valor P» es menor a 0.05.

En el ajuste del modelo de regresión también se vio necesario aplicar el procedimiento iterativo de Cochrane-Orcutt para corregir la autocorrelación presente en los datos. Esta autocorrelación es producto de agregar secuencialmente la variación de humedad y con esta corrección se mejora la estimación de los parámetros.

Los resultados de las pruebas se presentan a continuación.

3.1. Cantera Cerro Mocho

El modelo se seleccionó mediante *Stepwise Forward*, donde se obtiene:

$$(CH\ \%) = -7.372 + 3.206 \times CD \tag{31}$$

En este modelo, el efecto lineal del coeficiente dieléctrico con respecto al valor de humedad esperado resulta significativo. En la tabla siguiente se muestran los resultados del contraste de hipótesis donde el «valor P» del efecto lineal es menor a 0.05. Se tiene un modelo de regresión lineal de $R^2 = 95.8057$ % y un error estándar de 0.382134.

Tabla 1. Significancia del efecto de las variables

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	T-Student	Valor P
Constante	7.37238	0.378829	19.461	0.000
Cte_Dieléctrica	3.2059	0.0740563	43.29	0.000

La Figura 6 muestra la relación entre la constante dieléctrica y la humedad; la Figura 7, la relación del valor predicho y el real de la humedad.

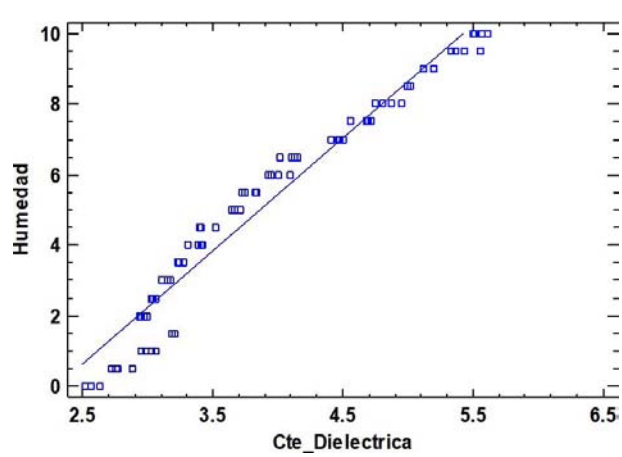


Figura 6. Gráfico del modelo ajustado

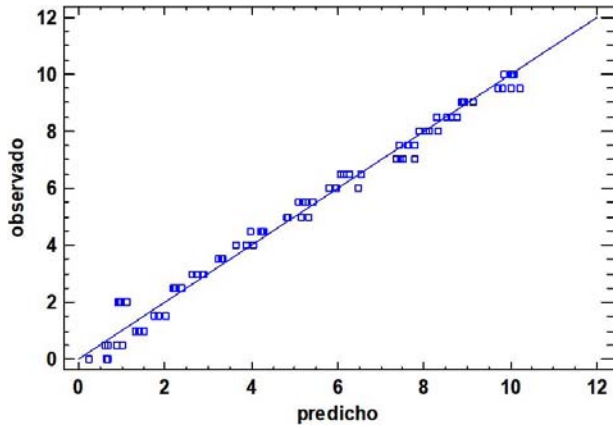


Figura 7. Relación gráfica entre el valor de humedad observado y el predicho

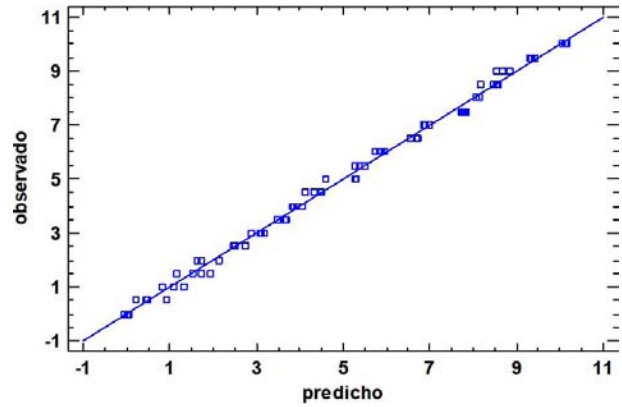


Figura 9. Relación gráfica entre el valor de humedad observado y el predicho

3.2. Cantera Moyobamba

El modelo se seleccionó mediante *Stepwise Forward*.

Donde el efecto lineal, cuadrático y cúbico del coeficiente dieléctrico con respecto al valor de humedad esperado son significativos.

$$(CH\,\%) = 38.55 + 18.15 \times CD - 2.52 \times CD^2 + 0.13 \times CD^3$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados del contraste de hipótesis donde el «valor P» de los efectos es menor a 0.05.

Tabla 2. Significancia del efecto de las variables

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	T-Student	Valor P
Constante	38.55	1.93216	19.9518	0.000
Cte_Dieléctrica	18.1473	1.045	17.3657	0.000
Cte_Dieléctrica2	2.52011	0.18239	13.8172	0.000
Cte_Dieléctrica3	0.1253	0.0102973	12.1681	0.000

Se tiene un modelo de regresión lineal de $R^2 = 99.5097$ % y un error estándar de 0.201714.

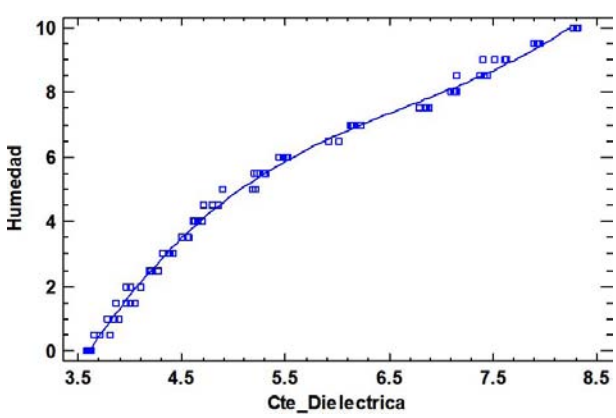


Figura 8. Gráfico del modelo ajustado

La Figura 8 muestra la relación entre la constante dieléctrica y la humedad; la Figura 9 indica la relación del valor predicho y el real de la humedad.

3.3. Cantera Sol-Sol

El modelo se seleccionó mediante *Stepwise Forward*.

$$(CH\,\%) = -15.5262 + 7.26581 \times CD - 0.506717 \times CD^2 \quad (32)$$

Donde el efecto lineal y cuadrático del coeficiente dieléctrico con respecto al valor de humedad resultaron significativos. En la Tabla 3 observamos que el «valor P» de los efectos es menor a 0.05.

Tabla 3. Significancia del efecto de las variables

Parámetro	Valor estimado	Error estándar	T-Student	Valor P
Constante	-15.5262	0.875589	17.7323	0.000
Cte_Dieléctrica	7.26581	0.41318	17.5869	0.000
Cte_Dieléctrica2	0.506717	0.0477948	10.6011	0.000

Se tiene un modelo de regresión lineal de $R^2 = 97.1325$ % y un error estándar de 0.297068.

La Figura 10 muestra la relación entre la constante dieléctrica y la humedad, mientras que en la Figura 11 se observa la relación del valor predicho y el real de la humedad.

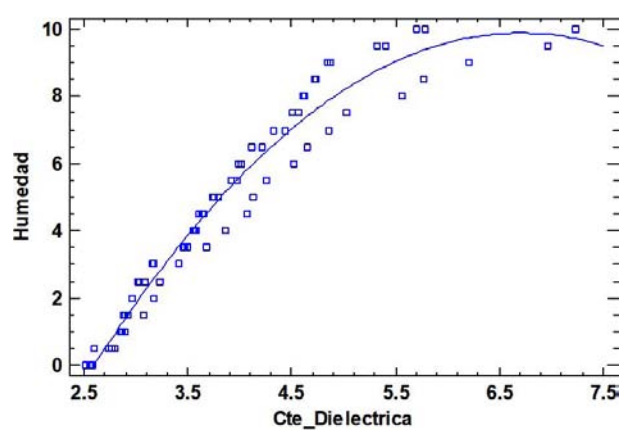


Figura 10. Gráfico del modelo ajustado

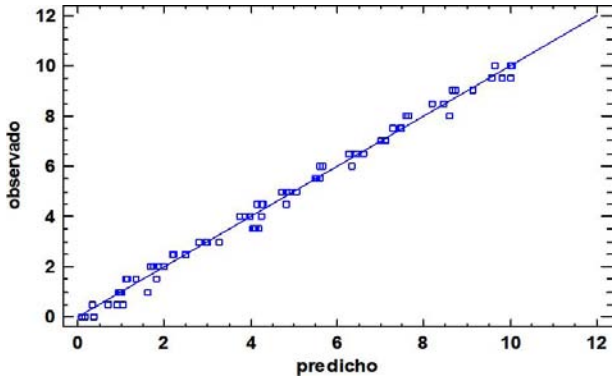


Figura 11. Relación gráfica entre el valor de humedad observado y el predicho

4. Discusión de resultados

Dados los resultados en el apartado anterior, es interesante ver que en la frecuencia de 1.5 GHz, las correlaciones de regresión lineal mantienen un $R^2 > 95$ % como se ve en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de resultados

Cantera	R^2	Error estándar
Cerro Mocho	95.8057	0.382134
Moyobamba	99.5097	0.201714
Sol-Sol	97.1325	0.297068

También se puede ver que existe una relación directa entre el CH y la CD, es decir, a mayor CH la CD aumenta en valor.

Comparando las ecuaciones de predicción del CH podemos observar que dependiendo de la procedencia del ADC se define su curva de calibración y esta puede variar entre lineal, cuadrática o cúbica, por lo que para fines prácticos primero se debería calibrar el ADC según una cantera específica antes de realizar la medición y esta curva no serviría para otra cantera, ya que los valores de CD difieren entre canteras. Esto era de esperarse ya que la CD depende de las propiedades moleculares y de la capacidad de almacenamiento de energía, lo que significa que a nivel molecular cada ADC tiene diferente estructura.

5. Conclusiones

La medición del CH con dispositivos que utilizan microondas tiene ventajas sobre los métodos invasivos porque no dañan el material. La medición de la CD con esta metodología analiza internamente el comportamiento del material para definir su CD, ya que estudia los momentos dipolares formados al inducir campos electromagnéticos en el material. Puede ser usado en presencia de vapores o ambientes sucios, mientras no cambien molecularmente al ADC ya que estos no interfieren con las señales de microondas. La ED, por lo tanto, permite la medición de una amplia gama de materiales, ya sean sólidos, gases o líquidos.

La medición se realiza sin contacto con el material. El método es no invasivo ni destructivo. La medición se realiza en tiempo real y en línea con el proceso.

Es interesante observar la relación encontrada por diferentes autores. En [17] el autor define una relación lineal o polinómica. Muestra los parámetros que influyen en el cálculo de la constante dieléctrica y la relación entre el contenido de humedad y la temperatura.

Se ha comprobado que con la metodología basada en ED a 1.5 GHz se obtienen valores de correlación lineal de alta precisión ($R^2 > 95$ %) para cada una de las canteras. El sistema ha sido validado en un transportador horizontal con agregado fino y antenas dispuestas de forma vertical.

Los resultados encontrados muestran la relación entre el CH y la CD en ADC, se ha podido apreciar que existe una variación en la curva de calibración entre una cantera y otra.

Este sistema de sensado presenta un alto potencial para ser usado para medir el CH en ADC en el proceso de fabricación de concreto.

Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por Concytec y Sencico, en el proyecto «Tecnologías de facilitación basadas en técnicas de microondas para la medición en tiempo real del contenido de humedad en materiales de construcción» - Contrato 108-2017.

Referencias

[1] J. B. Hasted and M. A. Shah, “Microwave absorption by water in building materials,” *British Journal of Applied Physics*, vol. 15, no. 7, pp. 825–836, jul 1964. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088%2F0508-3443%2F15%2F7%2F307

[2] A. Cataldo, E. De Benedetto, and G. Cannazza, “Hydration monitoring and moisture control of cement-based samples through embedded wire-like sensing elements,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 1208–1215, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360712

[3] F. P. Balobey, “Optimalisation of microwave method for moisture content measurement in asbestos-cement sheets,” *Russian: Oborudovanye Prom. Story. Meter, Instrum. for Build. Mater*, vol. 1, pp. 44–50, 1964.

[4] A. W. Kraszewski, "Microwave aquametry-needs and perspectives," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, no. 5, pp. 828–835, 1991. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/22.79110

[5] A. Kraszewski, "Microwave aquametry–a bibliography," *Journal of Microwave Power*, vol. 15, no. 4, pp. 298–310, 1980. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/16070658.1980.11689215

[6] V. Komarov, *Handbook of Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies.* Artech House, 2012. [Online]. Available: https://bit.ly/2WQE2Tv

[7] A. Cownie and L. S. Palmer, "The effect of moisture on the electrical properties of soil," *Proceedings of the Physical Society. Section B*, vol. 65, no. 4, pp. 295–301, apr 1952. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088%2F0370-1301%2F65%2F4%2F308

[8] J. J. Windle and T. M. Shaw, "Dielectric properties of wool–water systems. ii. 26 000 megacycles," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 25, no. 3, pp. 435–439, 1956. [Online]. Available: https://doi.org/10.1063/1.1742941

[9] A. Nakanishi, T. Hori, and J. Fujiwara, "An evaluation of"moister"as a measuring apparatus of the moisture content of paper," *Japanese: Res. Inst. Techn. Bull*, vol. 1, pp. 9–20, 1955.

[10] A. Yasukawa, "Measurement and automatic control of moisture content in rayon pulp: Soc. of instrum," *Technol. Japan J*, vol. 6, no. 8, pp. 386–391, 1956.

[11] R. Rodríguez Arisméndiz, "Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios," Ph.D. dissertation, 2017. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/11042/3487

[12] M. Berliner and S. A. Polishchuk, "Instrument for moisture content measurement in slurries," *Russian: Cement*, pp. 14–15, 1978.

[13] D. K. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería.* Pearson Educación, 1997. [Online]. Available: https://bit.ly/3cvOXIP

[14] A. R. Dean and P. Bridle, "Test on the use of a microwave moisture meter," *Timber Trade J.*, vol. 27, pp. 50–52, 1969.

[15] D. F. Tirado, P. M. Montero, and D. Acevedo, "Estudio comparativo de métodos empleados para la determinación de humedad de varias matrices alimentarias," *Información tecnológica*, vol. 26, pp. 03–10, 00 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000200002

[16] G. R. Oetzel, F. P. Villalba, W. J. Goodger, and K. V. Nordlund, "A comparison of on-farm methods for estimating the dry matter content of feed ingredients1," *Journal of Dairy Science*, vol. 76, no. 1, pp. 293–299, 1993. [Online]. Available: https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77349-X

[17] L. Jílková, T. Hlinčík, and K. Ciahotný, "Determination of water content in pyrolytic tars using coulometric karl-fischer titration," *Journal of Advanced Engineering*, vol. 57, no. 1, pp. 8–13, 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.14311/AP.2017.57.0008

[18] A. M. Helmenstine, "What is distillation? chemistry definition," *ThoughtCo*, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/2WLgTli

[19] L. M. L. Nollet, *Handbook of Food Analysis: Physical characterization and nutrient analysis*, ser. Food Science and Technology - Marcel Dekker, Inc. CRC PressI Llc, 2004. [Online]. Available: https://bit.ly/3fMQrAI

[20] G. S. Campbell and C. S. Campbell, "Water content and potential, measurement," in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.* Elsevier, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05333-1

[21] M. R. Goyal, *Management of Drip/Trickle or Micro Irrigation.* Apple Academic Press, 2012. [Online]. Available: https://bit.ly/2yJGaVl

[22] T. Reyna, J. Linares, M. Lábaque, and S. Reyna, "Métodos para medir el contenido de humedad *vs.* el tiempo. estudios de infiltración. evaluación de resultados de campo," in *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima Perú*, 09 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/3dIYexC

[23] S. Jiménez, L. Scarioni, and H. Kelim, "Nota técnica: Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo, fabricados con NaCl, KBr y KCl," *INGENIERIA UC*, vol. 20, no. 1, pp. 83–86, 04 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/2Wrj2Uv

[24] S. Okamura, "Microwave technology for moisture measurement," *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 205–227, 2000. [Online]. Available: https://bit.ly/2WWETC6

[25] E. Pinos-Vélez, S. Encalada, E. Gamboa, V. Robles-Bykbaev, W. Ipanque, and C. L. Chacón, "Development of a support system for the presumptive diagnosis of glaucoma through the processing of biomedical images of the human eye fundus in Ecuador," in *Advances in Human Factors and Ergonomics in*

Healthcare and Medical Devices, V. Duffy and N. Lightner, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 100–109. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60483-1_11

[26] J. Soto, E. Paiva, W. Ipanaqué, J. Reyes, D. Espinoza, and D. Mendoza, "Cocoa bean quality assessment by using hyperspectral index for determining the state of fermentation with a non-destructive analysis," in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229718

[27] J. M. Ruiz Reyes, J. Soto Bohorquez, and W. Ipanaque, "Evaluation of spectral relation indexes of the peruvian's cocoa beans during fermentation process," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 6, pp. 2862–2867, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7555266

[28] J. Soto, J. Ruiz, W. Ipanaqué, and C. Chinguel, "New hyperspectral index for determining the state of fermentation in the non-destructive analysis for organic cocoa violet," in *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778387

[29] J. Soto, G. Granda, F. Prieto, W. Ipanaque, and J. Machacuay, "Cocoa bean quality assessment by using hyperspectral images and fuzzy logic techniques," in *Twelfth International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015*, F. Meriaudeau and O. Aubreton, Eds., vol. 9534, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2015, pp. 152–158. [Online]. Available: https://doi.org/10.1117/12.2182598

[30] A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, "Microwave resonator technique for moisture content and mass determination in single soybean seeds," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, no. 3, pp. 487–489, 1994. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/19.293475

[31] P. G. Bartley, S. O. Nelson, R. W. McClendon, and S. Trabelsi, "Determining moisture content of wheat with an artificial neural network from microwave transmission measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 1, pp. 123–126, 1998. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/19.728803

[32] K.-B. Kim, J.-H. Kim, S. S. Lee, and S. H. Noh, "Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 1, pp. 72–77, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/19.989904

[33] M. Ben Slima, R. Z. Morawski, A. W. Kraszewski, A. Barwicz, and S. O. Nelson, "Calibration of a microwave system for measuring grain moisture content," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 3, pp. 778–783, 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/19.772221

[34] S. Trabelsi and S. O. Nelson, "Free-space measurement of dielectric properties of cereal grain and oilseed at microwave frequencies," *Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 589–600, mar 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088%2F0957-0233%2F14%2F5%2F308

[35] C. V. K. Kandala, "Moisture determination in single peanut pods by complex rf impedance measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 6, pp. 1493–1496, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIM.2004.834058

[36] Z. Abbas, You Kok Yeow, A. H. Shaari, K. Khalid, J. Hassan, and E. Saion, "Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 1281–1287, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.859249

[37] S. Trabelsi and S. O. Nelson, "Influence of nonequilibrated water on microwave dielectric properties of wheat and related errors in moisture sensing," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 1, pp. 194–198, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIM.2006.887314

[38] K. Tsukada and T. Kiwa, "Magnetic measurement of moisture content of grain," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2683–2685, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.892853

[39] C. V. K. Kandala and S. O. Nelson, "Rf impedance method for estimating moisture content in small samples of in-shell peanuts," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 3, pp. 938–943, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIM.2007.894796

[40] C. V. Kandala and N. Puppala, "Parallel-plate capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content of different types of wheat,"

in *2012 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 2012, pp. 1–5. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/SAS.2012.6166325

[41] S. T. Wahyuni Siregar, W. Handayani, and A. H. Saputro, "Bananas moisture content prediction system using visual-nir imaging," in *2017 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, 2017, pp. 89–92. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICA.2017.8068419

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.03
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico

Rapid prototyping in the manufacture of 3D printed molds for plastic blowing

Gilberto Carrillo[1,*], Carolina Nuila[2], Jorge Laínez[3]

Resumen

En la industria salvadoreña pueden encontrarse empresarios y microempresarios que no tienen los recursos para fabricar botellas de plástico con diseños estilizados que los diferencien de otras marcas y productos, lo que les impide escalar a otros segmentos de mercado o mercados internacionales, frenando el crecimiento de sus negocios. Una posible causa es que la fabricación de moldes de soplado requiere una inversión inicial muy costosa. Sin embargo, existen alternativas como la fabricación de moldes de bajo rendimiento, que tienen una resolución más baja y un tiempo de vida más corto, pero, al mismo tiempo, ofrecen como beneficio un menor costo de fabricación y, por lo tanto, un menor costo de adquisición para el empresario, posibilitando la producción de botellas estilizadas a conveniencia. Entre las diversas formas de fabricar moldes de bajo rendimiento está la técnica de ingeniería inversa, que requiere un equipo de creación rápida de prototipos. Este artículo describe el procedimiento de ingeniería inversa para generar el molde para soplado. Con el diseño disponible se imprimió el molde necesario y con esto se fabricaron las botellas, que se escanearon para verificar con el programa de computadora sus dimensiones comparándolas con el archivo original del molde. Simultáneamente, los contenedores se verificaron en el laboratorio de metrología industrial para validar los resultados de la computadora, estos resultados se presentan en el documento.

Palabras clave: molde para soplado, impresión 3D, creación rápida de prototipos, botellas de plástico

Abstract

In the Salvadoran industry, we can find entrepreneurs and microentrepreneurs who do not have the resources to make plastic bottles with stylized designs that differentiate them from other brands and products, which prevents them from escalating to other market segments or international markets, slows the growth of their business. One possible cause is that the manufacture of blow molds requires a very expensive initial investment. However, there are alternatives such as the manufacture of low-run molds, which have lower resolution and shorter life time, but, at the same time, offer as a benefit a lower manufacturing cost and, therefore, lower acquisition cost for the entrepreneur, opening in this way the opportunity to be able to produce stylized bottles at convenience. Among the various ways to manufacture low-run molds, there is the reverse engineering technique, which requires rapid prototyping equipment. This article describes the reverse engineering procedure to generate the mold for blowing. With the available design the necessary mold was printed and with this, the bottles were manufactured, which were scanned to verify with computer program their dimensions comparing them against the original mold file. Simultaneously, the containers were verified in the industrial metrology laboratory to validate the computer results, these results are presented in the document.

Keywords: Mold for blowing, 3D printing, rapid prototyping, plastic bottles.

[1,*]Centro de Innovación en Diseño Industrial y Manufactura, Universidad Don Bosco, El Salvador. Autor para correspondencia ✉: gilberto.carrillo@udb.edu.sv. http://orcid.org/0000-0002-9845-1381

[2]Laboratorio de Metrología, Universidad Don Bosco, El Salvador. http://orcid.org/0000-0002-7626-389X

[3]Herramientas Centroamericanas S. A. de C. V., El Salvador. http://orcid.org/0000-0001-7940-5366

Recibido: 04-02-2020, aprobado tras revisión: 06-05-2020

Forma sugerida de citación: Carrillo, G.; Nuila, C. y Laínez, J. (2020). «Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 28-35. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.03.

1. Introducción

Los fabricantes de recipientes de plástico y los empresarios salvadoreños no pueden adquirir nuevos moldes de aleación de aluminio y acero para nuevos productos, ya que esto requiere una alta inversión inicial que solo puede ser amortizada con una elevada producción de productos [1]. Como ejemplo, las versiones metálicas del molde de soplado de botellas pueden costar desde 2000 hasta 5000 USD, los cuales si se fabrican regionalmente pueden recibirse entre 30 y 60 días, y fabricados en Europa o Norteamérica puede recibirse desde 90 hasta 150 días [2]. Esto implica que las micro, pequeñas y medianas compañías salvadoreñas, con bajos márgenes de ganancia, no pueden incorporar en su oferta nuevos productos con recipientes de plásticos diferenciados.

Como una solución alternativa a los moldes, la impresión 3D se convierte en una «innovación tecnológica revolucionaria impulsada por la flexibilidad que proporciona y la economía potencialmente favorable» [3]. Otras aplicaciones de los moldes impresos son su uso en la fabricación a mano de piezas compuestas [4], fabricación de piezas plásticas [5], desarrollo de moldes de inyección de cera de bajo costo [6]. Mientras que altera los enfoques tradicionales de fabricación y promueve la expansión de tecnologías de prototipado rápido y fabricación digital.

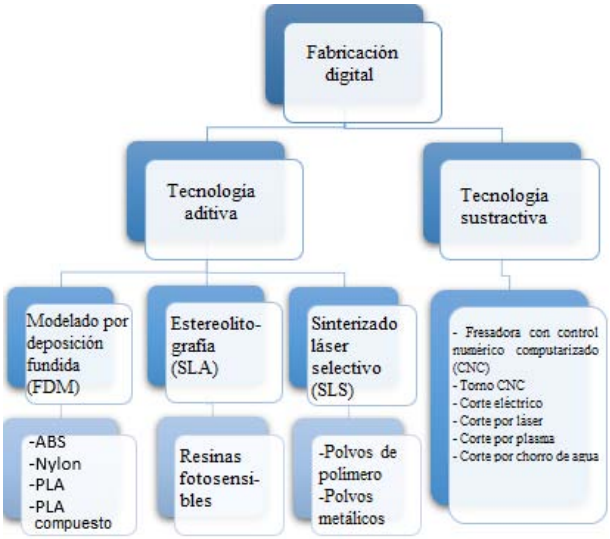


Figura 1. Técnicas de fabricación digital

Como se muestra en la Figura 1, las tecnologías de fabricación digital pueden clasificarse en aditivas, como impresión 3D, y sustractivas, como equipos de corte con CNC (control numérico computarizado).

Existen prácticas en los Estados Unidos y Europa, donde utilizan tecnologías aditivas tales como SLA (Estereolitografía, *Stereolithography* por sus siglas en inglés) y SLS (Sinterizado Láser Selectivo) en la fabricación de moldes por inyección [7]. Estas tecnologías son de elevada inversión y útiles en la producción a pequeña escala.

Hasta donde saben los autores, la técnica de FDM (modelado por deposición fundida, *Fused Deposition Modeling* por sus siglas en inglés) ha sido poco utilizada en la fabricación de moldes. Este trabajo presenta la fabricación de un molde por medio de la tecnología FDM de prototipado rápido y baja inversión, con la cual se producen recipientes con diseños estilizados para cada necesidad.

2. Materiales y métodos

Considerando las técnicas de modelado, los métodos de generación de moldes podrían clasificarse en ingeniería inversa y proceso CAD (Computer Aided Design, diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés), representado en la Figura 2 y descrito en 5 etapas.

Aplicando ingeniería inversa, se escaneó un recipiente suministrado por la industria, a partir del cual se obtuvo el molde para ser estudiado.

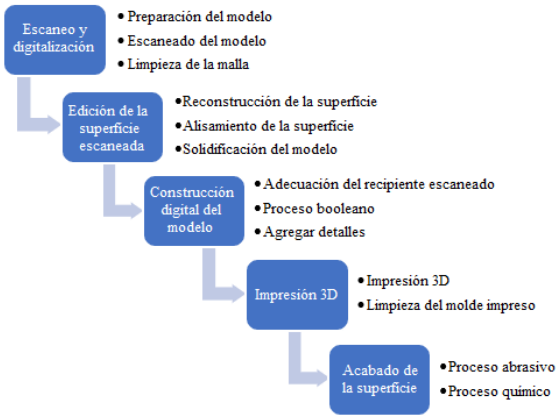


Figura 2. Etapas de aplicación del prototipado rápido

En la etapa 1, se utilizó el escaneado y el equipo de escaneado SmartScan R2-C2 con una precisión de 0,01 mm y su *software* Optocat 2015®. El líquido revelador es CANTESCO D101-A para atenuar el brillo y la reflexión de las superficies a ser escaneadas. El procedimiento de escaneado se hace de conformidad con el manual de usuario OPTOCAT versión 2015R2 [8].

La temperatura del salón de prototipado rápido se mantuvo en condiciones estables (24 ºC), y la entrada de luz desde el exterior se redujo menos de 25 % de la imagen en directo iluminada para evitar el ruido en las imágenes escaneadas debido a las variaciones de la luz. La nube final de puntos es almacenada en un archivo con formato STL (lenguaje estándar de triángulo, Standard Triangle Language), para luego trabajar en otro *software*.

En la etapa 2 se realizó la edición de la superficie escaneada con el tratamiento de la nube de puntos,

utilizando el *software* CAD GeoMagic Design X. El archivo generado fue almacenado en formato STEP (estándar para el intercambio de información de producto, Standard for the Exchange of Product Data), que evita la pérdida de información de diseño.

Para la etapa 3 se llevó a cabo la construcción del molde con el *software* Inventor. Se incorporaron las dimensiones del bloque, los agujeros de alineación, la rosca, los agujeros de escape de aire y el diseño de la boquilla.

Dentro de la etapa 4, el material utilizado en la impresión 3D de los moldes de soplado fue el ABS-plus (acrilonitrilo butadieno estireno) P430-XL, el material de soporte es SR-30XL (soporte soluble), el material de las botellas es PET (polietileno tereftalato). Asimismo, el proceso de impresión 3D fue realizado de acuerdo con el manual de usuario de la impresora uPrint SE Plus; el *software* utilizado se llama CatalystEX y el sistema de eliminación de soporte es el equipo WaveWash que trabaja por medio de lavado ultrasónico [9]. El molde fue utilizado en la compañía POLIFLEX para fabricar 25 botellas de prueba. Con esta primera corrida surgen las recomendaciones que constituyen la etapa 5.

En la misma, el acabado de la superficie del molde fue hecho con masilla automotriz en la cavidad donde se forma el recipiente. El lijado manual fue realizado con papel de lija 1000 para mejorar la suavidad de la superficie, y facilitar el deslizamiento del PET durante el soplado.

Fuera del proceso de ingeniería inversa, los recipientes fueron escaneados para ser comparados por medio de *software*, y se realizaron pruebas en el laboratorio de metrología industrial para validar sus resultados.

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados en el orden de los bloques mostrado en la Figura 2.

Etapa 1. Una nube de puntos fue obtenida del proceso de escaneado y digitalización, tal como se muestra en la Figura 3. No fue necesario escanear la boquilla del recipiente, debido a que el diseño de dicha boquilla fue incorporado en la etapa posterior de construcción digital, de acuerdo con la máquina sopladora. La posibilidad de cambiar de boquilla en el molde ocurre cuando se planea producir recipientes con máquinas que requieren preformas.

Etapa 2. La edición de la superficie escaneada consiste de un conjunto de operaciones para obtener un cuerpo alisado, como corte, combinación, reparación, alisado de superficies y bordes. El archivo STL puede mejorarse con cualquier *software* CAD.

La botella final se muestra en la Figura 4, y puede incorporar detalles finales característicos tales como formas adicionales, áreas para etiquetado, textos y logos en alto y bajorrelieve, etc.

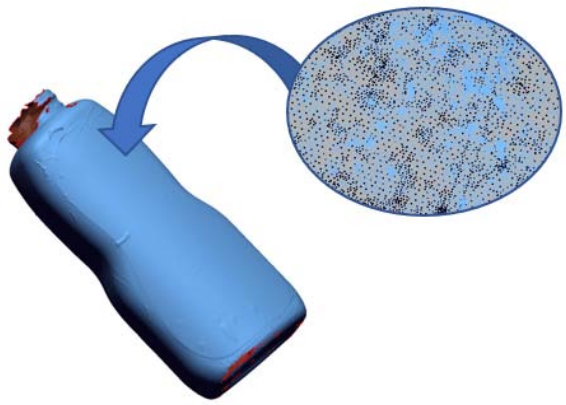


Figura 3. Nube de puntos del recipiente con formato STL, resultante del proceso de escaneado 3D y de escaneado y listo para ser procesado con software CAD

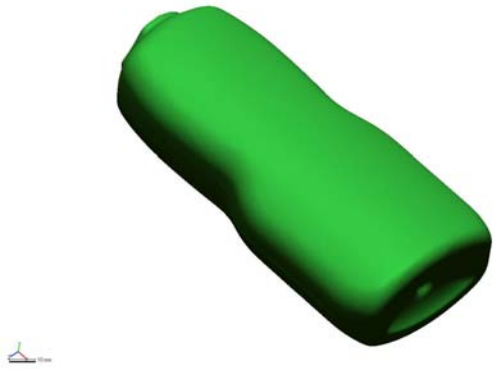


Figura 4. Botella alisada por computadora y acabada

Etapa 3. La construcción digital del molde consiste en la transformación de la botella de la etapa previa (etapa 2) a sólido en el CAD. El cuerpo sólido en forma de media botella es adherido por medio de un proceso de corte de objetos sólidos en el *software* CAD, y posteriormente se agregan los detalles del molde, como por ejemplo, los agujeros de fijación, roscas, agujeros de escape y el espacio de la boquilla.

Algunas consideraciones importantes previstas en la digitalización del molde, y que tienen influencia sobre la calidad de los productos son:

- No existieron defectos en la superposición de los volúmenes del recipiente y del molde.
- El espesor de las superficies en los bordes permitió resistir las cargas recibidas.
- Las curvaturas de las geometrías y de las superficies son correctas para reducir la concentración de esfuerzos.

- Se indicó la alineación de agujeros, pernos, superficies y bordes para evitar irregularidades en las superficies de productos manufacturados [10].
- Las tolerancias de los agujeros fueron correctas para que ambas partes pudieran ser acopladas durante la producción de recipientes con ajuste deslizante [11].
- Las dimensiones del escape de aire fueron adecuadas para que no se vieran marcas en los recipientes manufacturados.

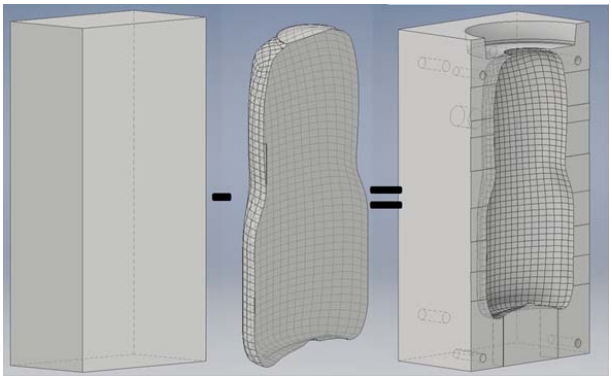


Figura 5. Secuencia de procesos para la fabricación de un molde: El cuerpo sólido en forma de media botella es adherido por medio de un proceso de corte de objetos sólidos en el *software* CAD, y posteriormente se agregan los detalles del molde, como por ejemplo, los agujeros de fijación, respiraderos y el espacio de la boquilla

La boquilla depende del tipo de máquina donde será instalado el molde y el tipo de materia prima. Por ejemplo, la boquilla de la máquina de moldeo por soplado forma la rosca externa y utiliza material granulado, mientras que la boquilla de la máquina de preformas es lisa porque esta recibe las preformas con su rosca ya fabricada. Con esta información se dibujó una boquilla al molde, como se muestra en la Figura 5.

Los moldes fueron diseñados con un fondo removible, el cual debe ser removido durante el desmoldado del recipiente, e instalado durante el cierre del molde. Su función es evacuar el aire durante el soplado, y formar el fondo del recipiente para proporcionarle estabilidad mientras permanece en superficies horizontales planas.

El molde diseñado fue analizado por medio de una computadora con el *software* CAE Inventor (ingeniería asistida por computadora, Computer Aided Engineering), aplicando una presión de 350 psi en las superficies curvas, la cual es la presión de soplado para la fabricación de botellas. Los resultados se muestran en la Figura 6, donde se observa una deformación promedio de 0,66 mm representada por el área verde, y una deformación máxima de 1,026 mm en el fondo del molde representada por el área roja.

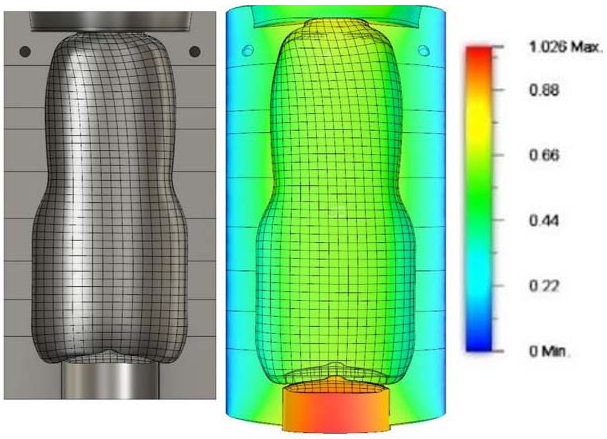


Figura 6. Puntos críticos de la deformación del molde, considerando los puntos de concentración de esfuerzos calculados por el *software* y mostrados en la paleta de colores. La presión de carga simulada fue 350 psi, la temperatura de análisis 100 °C, y las unidades de la deformación se muestran en la escala de colores en milímetros

Etapa 4. ABS fue utilizado como material de impresión, Figura 7. La altura de las capas de impresión es 0,25 mm, el espesor de la carcasa de la superficie exterior 10 mm, la densidad de relleno en la pared 100 %, la densidad de relleno en el medio 60 %, el espesor de las capas sólidas tope/fondo 10 mm, con el equipo uPrint SE plus que genera superficies curvas con baja resolución. Esto es una dificultad cuando se necesitan botellas lisas, mientras que es una ventaja para diseños estilizados con superficie irregular. En este caso el fondo del molde fue impreso como parte de una de las mitades y aunque mostró cierta interferencia en el desmoldado, afectó 2 botellas de 25, por lo que se consideró que no tuvo efecto negativo durante la fabricación.

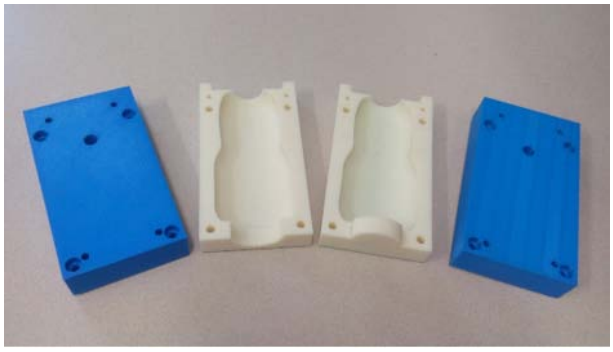


Figura 7. Moldes de soplado para botellas impresas en ABS

El molde para soplado de botellas se muestra en la Figura 7. El molde para impresión 3D incluye material ABS y material de soporte suministrados por

proveedores en El Salvador. La Tabla 1 muestra los costos de impresión 3D. El costo principal corresponde a los materiales y al tiempo del diseñador; el costo de los materiales puede reducirse utilizando una impresora 3D de código abierto, y permite investigar acerca de nuevos materiales para impresión 3D con mejores propiedades mecánicas. El tiempo de trabajo en CAD puede optimizarse practicando para mejorar las habilidades.

Tabla 1. Costo de los moldes 3D impresos, utilizando precios de materiales existentes en el mercado salvadoreño

Costo del molde de impresión 3D		
Material de impresión (centímetros cúbicos)	552.48	
Material de soporte (centímetros cúbicos)	227	
Material de impresión, cm^3 (costo unitario)	$ 0.42	
Material de soporte, cm^3 (costo unitario)	$ 0.42	
Costo total del material de impresión	$ 232.04	$ 232.04
Costo total del material de soporte	$ 95.34	$ 95.34
Costo de la energía para impresión	$ 0.86	
Amortización por hora	$ 2.65	
Tiempo de impresión	12	
Potencia (KW)	1.5	
Amortización durante la impresión	$ 3.98	
IVA (El Salvador)	13%	
Costo total de la energía	$ 21.98	$ 21.98
Diseño/configuración (horas)	14	
Diseño/configuración (costo unitario)	$ 10.00	
Costo total diseño/configuración	$ 140.00	$ 140.00
Costo total del molde de impresión 3D		$ 489.36

Figura 8. Botellas plásticas hechas con el uso de moldes impresos

Utilizando el molde impreso, se obtuvieron 25 recipientes en una compañía de producción; el molde fue instalado en una de sus máquinas sopladoras y se produjeron botellas, como se muestra en la Figura 8. El molde y las botellas fueron verificados con la ayuda de un escáner, determinándose que estaban en buenas condiciones dimensionales. Se considera que las superficies de interés para ser evaluadas son aquellas que soportaron la presión de las preformas durante la operación de soplado, y las superficies que soportaron la presión de cierre de las máquinas.

Las botellas fueron escaneadas y comparadas con el diseño del molde en el formato CAD. La Figura 9 muestra los puntos de los recipientes verificados digitalmente, según los puntos críticos resultantes del análisis del molde en la Figura 6 con el CAE Inventor. En términos generales, las dimensiones de los recipientes están en el rango de un décimo y medio milímetro por encima de las dimensiones promedio, y tres décimos de milímetro por debajo del promedio.

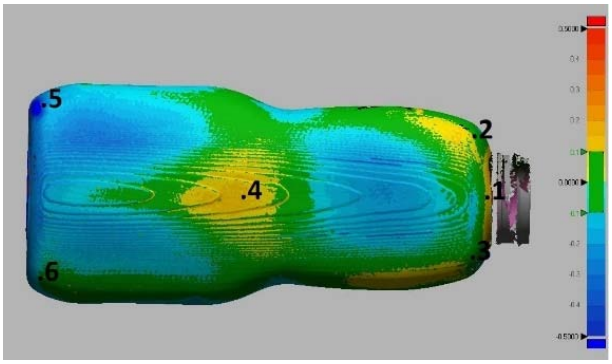


Figura 9. Verificación digital de las dimensiones de los recipientes producidos con el molde impreso junto con su paleta de colores

Los colores azul, azul claro, verde y amarillo en la Figura 9 denotan desviaciones mínimas del modelo escaneado con respecto al modelo digital, por lo que se verifica que las botellas fabricadas se mantienen en los rangos de +0,15 y –0,2 mm. Los resultados de la medición obtenidos con la técnica digital se muestran en la Tabla 2. El color marrón denota una alta desviación positiva/negativa y el color amarillo indica baja desviación positiva/negativa, a partir de las dimensiones promedio; las dimensiones son A = 168,168 mm (alto), B = 61,130 mm (anchura superior), C = 72,610 mm (anchura inferior), D = 41,518 mm (profundidad superior), E = 43,049 (profundidad inferior).

Los recipientes fueron analizados en el laboratorio de metrología para verificar hermeticidad, dimensiones y peso [12]. Los puntos de verificación y parte del equipo utilizado se muestran en la Figura 10, y la Tabla 3 da a conocer un extracto de los valores promedio y extremos determinados. De manera similar, la Tabla 4 presenta un extracto de los pesos determinados, indicando los valores extremos y promedio. Es importante notar que ninguna de las botellas presenta fugas luego de ser probadas con agua.

Tabla 2. Resultados de la diferencia en las mediciones entre los recipientes producidos y el molde impreso

Numero botella	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
1	0.0723	0.1644	0.0917	0.0881	-0.1216	0.0280
2	0.1439	0.1445	0.0832	0.0277	-0.0110	0.0636
3	0.1182	0.1125	0.0790	0.0624	-0.0580	0.0896
4	0.0175	0.1001	0.1109	0.0551	-0.0569	0.3939
5	0.0784	0.0383	0.0622	0.1062	-0.1231	0.0720
6	0.1094	0.0512	0.0196	0.1632	-0.2330	-0.0138
7	0.0704	0.1229	0.0094	0.1078	-0.2044	0.0223
8	0.0869	0.1268	0.0843	0.1458	-0.2595	-0.1917
9	0.1063	0.0729	0.0508	0.1260	-0.1681	-0.0795
10	0.1126	0.0972	0.0793	0.1312	-0.3859	-0.2118
11	0.1419	0.1103	0.1031	0.1056	-0.2024	-0.0397
12	0.1232	0.1455	0.1077	0.0906	-0.3409	-0.1720
13	0.1664	0.1377	0.1204	0.1109	-0.1183	-0.0979
14	0.1471	0.1288	0.0862	0.0909	-0.2086	-0.2159
15	0.1109	0.1257	0.0665	0.1428	-0.1994	-0.0293
16	0.1072	0.0673	0.0558	0.1033	-0.3444	-0.1224
17	0.1411	0.0258	0.0120	0.0973	-0.3811	-0.1013
18	0.1465	0.0938	-0.0205	0.1325	-0.3631	-0.0562
19	0.1019	0.0603	-0.0090	0.1041	-0.3061	-0.0247
20	0.1286	0.0966	0.0455	0.1397	-0.1682	-0.0201
21	0.1182	0.1136	-0.0018	0.1095	-0.2294	-0.0770
22	0.0677	0.1241	0.0256	0.1068	-0.1644	-0.0080
23	0.1159	0.1199	0.0478	0.1164	-0.1837	-0.0226
24	0.1147	0.1887	0.0476	0.1233	-0.1654	-0.0870
25	0.0905	0.1295	0.0803	0.0793	-0.2773	-0.0214

El equipo de verificación utilizó escáner 3D y el *software* GeoMagic.

Tabla 3. Diagrama de referencia para el análisis dimensional y ejecución de los test dimensionales con las dimensiones A alto, B anchura superior, C anchura inferior, D profundidad superior, E profundidad inferior

Resultados de la verificación de las 25 botellas (mm)										
Dimensión	**A**		**B**		**C**		**D**		**E**	
Vref	168.168		61.130		72.610		41.518		43.049	
ID de la botella	**Valor promedio Vm**	**Error Vm - Vref**	**Valor promedio Vm**	**Error Vm - Vref**	**Valor promedio Vm**	**Error Vm - Vref**	**Valor promedio Vm**	**Error Vm - Vref**	**Valor promedio Vm**	**Error Vm - Vref**
1	168.160	0.008	61.073	**0.057**	73.038	-0.027	41.335	0.182	42.941	0.107
2	168.219	-0.051	61.075	0.056	73.003	0.007	41.250	0.267	42.907	**0.142**
3	168.148	0.020	61.098	0.032	72.986	0.024	41.167	**0.351**	42.979	0.069
4	168.173	-0.005	61.089	0.041	72.981	**0.029**	41.335	0.183	42.980	0.069
5	168.268	**-0.100**	61.082	0.049	72.993	0.017	41.315	0.203	42.978	0.070
12	168.162	0.006	61.137	-0.007	73.000	0.011	41.758	**-0.240**	42.990	0.059
15	168.148	0.020	61.131	-0.001	73.041	-0.030	41.527	-0.009	43.151	**-0.103**
18	168.139	0.029	61.173	-0.042	73.051	**-0.041**	41.604	-0.087	43.109	-0.060
24	168.044	**0.124**	61.182	**-0.052**	72.986	0.024	41.669	-0.152	43.120	-0.072

Tabla 4. Resultados de la medición del peso de los 25 recipientes (mm)

Resultados de la verificación de las 25 botellas (g)		
Wref		283.538
ID de la botella	**Valor promedio Wm**	**Error Wm - Wref**
1	283.194	-0.0345
2	286.626	0.3087
5	283.559	0.0021
7	283.558	0.0020
8	283.555	0.0016
9	283.557	0.0018
22	283.289	-0.0249
23	283.252	-0.0287
24	283.236	-0.0302
25	283.202	-0.0336

Los resultados en naranja son las mayores desviaciones por encima del promedio y en amarillo las mayores desviaciones por debajo del promedio. Valores de Wm en gramos

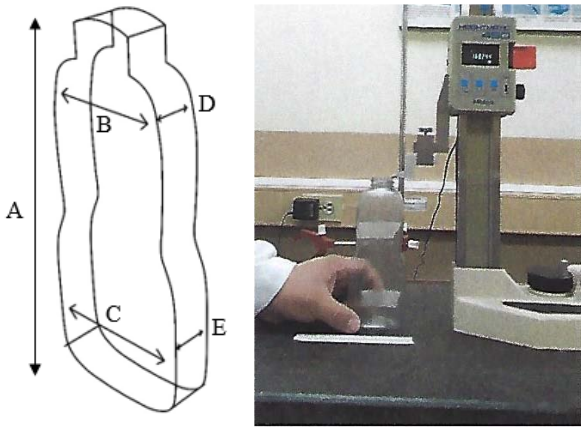


Figura 10. Diagrama de referencia para el análisis dimensional y ejecución de los test dimensionales con las dimensiones A alto, B anchura superior, C anchura inferior, D profundidad superior, E profundidad inferior

Etapa 5. Para mejorar el acabado de la superficie, se aplicó masilla automotriz al molde y se alisó con papel de lija de grado 1000, lo que resultó en una superficie lisa con rugosidad no evidente al toque. Esta operación es una variante del procedimiento normal de prototipado, donde los modelos impresos en FDM 3D son utilizados sin procesamiento ulterior. Este proceso artesanal es recomendado porque es barato y no toma mucho tiempo o hace al molde más costoso, lo cual se transforma en un beneficio para una SME de bajo presupuesto. La nota técnica de Hernández [13] se refiere al nivel de rugosidad o a los efectos de la suavidad en el flujo del *parisón* durante el soplado debido a la fricción contra la superficie del molde. Este hecho puede parecer contraproducente, sin embargo, luego de observar los primeros recipientes, la textura de la superficie puede ser un elemento distintivo para SME que pueden incorporar diferentes diseños en su empaque.

Un resultado útil para usuarios SME del molde es el tiempo que transcurre desde el escaneado hasta la entrega del molde acabado y limpio, que fue de 6 días. El tiempo de entrega es un factor positivo cuando se compara a los tiempos de entrega del molde a nivel regional y fuera de la región de Centroamérica.

4. Conclusiones

El trabajo realizado muestra que es posible aplicar ingeniería inversa para fabricar un molde impreso 3D con la técnica FDM [14]. Los recursos de la ingeniería inversa son usualmente equipo de escaneo 3D, computadoras y *software* de escaneo, equipo de impresión 3D, y equipo de medición y verificación, entre otros.

El proceso de digitalización es replicable por instituciones que tienen un escáner 3D de alta definición, donde su producto será el archivo digital del molde. El archivo resultante será utilizado para fabricar el molde en cualquier institución que tenga una impresora 3D, cuando los recursos son escasos; sin embargo, cuando los recursos necesarios están disponibles, el archivo puede usarse para generar códigos que son introducidos en el equipo de fabricación de control numérico computarizado.

Este trabajo da una perspectiva para desarrollar investigación en tratamientos superficiales de moldes de polímero para el aumento de la durabilidad, estudio del uso de moldes de baja cadencia en procesos de termoformación, moldeado de plásticos biodegradables con el uso de moldes impresos y moldes para materiales compuestos reforzados. Estos resultados son antecedentes para aquellos que tienen *software* e impresoras 3D que pueden incorporarse en el campo productivo, ofreciendo servicios de diseño y fabricación de moldes impresos.

Agradecimientos

Esta investigación fue llevada a cabo gracias al apoyo financiero de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, United States Agency for International Development), en su programa de Educación Superior para el Crecimiento Económico, el apoyo económico y la infraestructura de la Universidad Don Bosco, y la colaboración de la compañía Polietileno y Flexografía S. A. de C. V.

Referencias

[1] Ministerio de Economía de El Salvador, "*Política nacional de fomento diversificación y transformación productiva*," 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/3fLvtCe

[2] R. Martell, *Esperiencias en la empresa Roma Chemical*, 2019.

[3] G. Unruh, "Circular economy, 3d printing, and the biosphere rules," *California Management Review*, vol. 60, no. 3, pp. 95–111, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0008125618759684

[4] T. Z. Sudbury, R. Springfield, V. Kunc, and C. Duty, "An assessment of additive manufactured molds for hand-laid fiber reinforced composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5, pp. 1659–1664, May 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9464-9

[5] A. Baranov, A. I. Pronin, V. A. Dikov, A. V. Zakharov, and M. G. Lagutkin, "Casting molds for the routine production of plastic hydrocyclone components," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 45, no. 7, p. 513, Oct. 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10556-009-9219-7

[6] C.-C. Kuo, W.-H. Chen, X.-Z. Liu, Y.-L. Liao, W.-J. Chen, B.-Y. Huang, and R.-L. Tsai, "Development of a low-cost wax injection mold with high cooling efficiency," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 5, pp. 2081–2088, Nov. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00170-017-0596-3

[7] Sander Kunststofftechnik. (2017) Development and production of prototypes and small series made of plastic. [Online]. Available: https://bit.ly/3dAip0C

[8] AICON 3D SYSTEMS GMBH, *OPTOCAT 2015R2 – New version, new functions*, 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/3cvv8l7

[9] Stratasys, *Manual del usuario uPrint SE and uPrint SE plus personal 3D printers*, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/2T1H2eQ

[10] S. Belcher, *Practical Extrusion Blow Molding*, 1999. [Online]. Available: https://bit.ly/2WuzVha

[11] I. Suchy, *Handbook of die design*. McGraw-Hill, 2005. [Online]. Available: https://bit.ly/35YaWGb

[12] L. Espinoza and C. Nuila, *I18RE-MD001 Mediciones dimensionales a botellas de muestra*. Laboratorio de Metrología Industrial, Soyapango, 2018.

[13] J. Hernández, *Nota técnica: Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET*. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2013.

[14] 3D Printers. (2018) Impresoras 3d para plástico. [Online]. Available: https://bit.ly/2Z2nISf

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.04
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada

Proposal for implantation of coffee drying greenhouse with parabolic cover and adapted modular structure

Bryan Briceño-Martínez[1,*], Jairo Castillo-Calderón[1], Rubén Carrión-Jaura[1], Diego Díaz-Sinche[1]

Resumen

El presente trabajo propone un invernadero destinado al secado de café formado por una cubierta solar parabólica y estructura modular adaptada. Se inició a través de un levantamiento planimétrico elaborado por diferentes *softwares* de ingeniería y arquitectura como: SolidWorks y Revit Architecture. Para el experimento se utilizaron principios de ingeniería inversa, tomando como base una estructura ya existente para desarrollar un modelo de acople modular, con el fin de establecer interacciones entre mecanismos y estructura. El estudio demostró que el diseño de los acoples de armado, facilitan su movilización, reducen costos y permiten la aplicación de materiales accesibles para el secador parabólico solar (marquesina), adicionalmente se presentan curvas de secado de café en un secador solar tipo parabólico y su tiempo representados en Statgraphics. El resultado del modelo con acoples de armado modular se asoció correctamente con resultados experimentales existentes, permitiendo realizar comparaciones entre tiempo y eficiencia del secado de café.

Palabras clave: ingeniería inversa, diseño, marquesina, manufactura, parabólica, Statgraphics

Abstract

The present work proposes a greenhouse for coffee drying, constituted by a parabolic solar cover and adapted modular structure. It started with a planimetric survey made using different engineering and architecture software, such as: SolidWorks y Revit Architecture. For the experiment, reverse engineering principles based on an existing structure, were used to develop a modular coupling model, in order to establish interactions between mechanisms and structure. The study demonstrated that the design of the assembly couplings facilitates their mobilization, reduces costs and allows the application of accessible materials for the solar parabolic dryer (marquee). Also, the coffee drying curves in a parabolic type solar dryer and their time are shown in Statgraphics. The result of the model with modular armature couplings was correctly associated with the existing experimental results, allowing to compare the time and efficiency of the coffee drying.

Keywords: reverse engineering, design, marquee, manufacturing, parabolic, Statgraphics.

[1,*]Facultad de Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: bryan.briceno@unl.edu.ec.
http://orcid.org/0000-0002-9428-3341 http://orcid.org/0000-0002-5321-4518
http://orcid.org/0000-0003-2068-6882 http://orcid.org/0000-0003-4910-7151

Recibido: 27-11-2019, aprobado tras revisión: 09-05-2020

Forma sugerida de citación: Briceño-Martínez, B.; Castillo-Calderón, J.; Carrión-Jaura, R. y Díaz-Sinche, D. (2020). «Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 36-46. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.04.

1. Introducción

El sector mundial del café constituye un importante medio de vida para millones de personas, sobre todo, para países en desarrollo. En su producción, Sudamérica representa el 47 % a nivel mundial, seguida de Asia y Oceanía con el 29 %, América Central y México con el 13 % y África con el 11 %. La producción de Brasil, el mayor productor cafetero del mundo, aumentó un 5,6 % y fue de 57,4 millones de sacos, entre los que estuvo parte de la cosecha de abril de 2018 a marzo de 2019. Se calcula que el consumo de café en Sudamérica, tras un incremento del 3,5 % en 2016/2017, aumentó un 1,8 % y fue de 26,97 millones de sacos [1].

El uso de energía solar en el sector agrícola va aumentado debido a la dilatación del precio de los combustibles, la contaminación del medioambiente y el agotamiento pronosticado de los combustibles fósiles convencionales. El secado por energía solar es una de las aplicaciones más llamativas y prometedoras en zonas rurales. Habitualmente los cultivos agrícolas se secan al exponerlos al sol, esto contribuye a alargar la vida útil de los productos cosechados, mejorando la calidad, posición y negocio del agricultor con el fin de mantener un precio constante en sus productos.

El secado directo al sol requiere una gran área de espacio abierto, y depende en su gran mayoría de la disponibilidad de luz solar, susceptible a la contaminación con materiales extraños como polvo, basura y otros químicos que pueden ser arrastrados por el viento, así como a pájaros, insectos y roedores. De igual forma, la mayoría de los productos agrícolas destinados a ser almacenados deben secarse primero ya que pueden ser afectados por plagas de insectos y hongos que se desarrollan con facilidad cuando existen condiciones húmedas, volviéndose inutilizables [2].

En un día pico se puede obtener el equivalente al 2,0 % de café lavado (escurrido) del total de una producción anual, en una finca con una producción de 2500 kg c. p., para ello se requieren 3,3 m^2 de piso, con una altura máxima de la capa de 3 cm [3].

Con el fin de permitir un mejor el aprovechamiento de la energía solar, disminuir el costo y facilitar la construcción, operación y mantenimiento, se mejoró un secador solar parabólico, marquesina. Esta, al igual que el secador tipo túnel solar, consta de una estructura metálica, una cubierta plástica transparente, piso encementado, compuertas enrollables de plástico transparente y una puerta de acceso interno. El secador solar facilita una calidad aceptable de producto codiciado con un impacto ambiental bajo, por lo tanto, un método eficaz, barato y seguro de secado agrícola y de productos alimenticios.

En la Figura 1 se muestra la marquesina que ocupa un área total de 18 m^2, su piso de concreto contribuye a ser una zona limpia, alojando dos columnas de estanterías con seis camas de secado cada una de 6 m^2 que son expuestas al sol. Los cobertores de plástico se enrollan y se elevan cuando existe presencia de lluvia o cuando la temperatura estimada no es la correcta, por lo tanto, la altura de las camas de secado con respecto al piso es de 0,60 m, así se disminuye la posibilidad de que se contamine el café por efecto del pisoteo de los operarios o por el ingreso accidental de animales [4].

Figura 1. Marquesina

1.1. Secador solar

Los secadores solares se clasifican generalmente en tres categorías, como se muestra en la Figura 2.

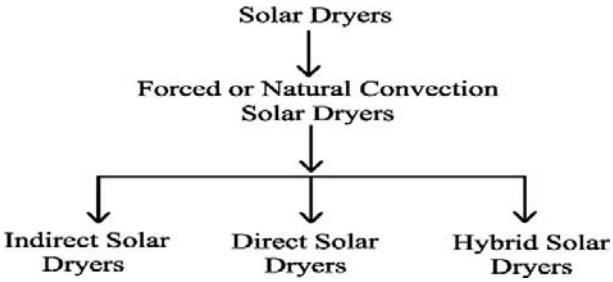


Figura 2. Clasificador de secadores solares [4]

En este contexto se enfocará en el secador solar directo, debido a que la humedad del producto a secar se elimina por el impacto directo de la radiación solar en el propio producto con o sin la circulación de aire natural [4]. En la Figura 3 se indica una vista esquemática del secador solar directo.

El secado solar directo posee una cámara de secado, una caja aislada envuelta por una cubierta transparente de vidrio o plástico, que tiene orificios para permitir que el aire entre y salga de la cámara [5]. Cuando la radiación solar afecta a la cubierta de vidrio o plástico, el aire se calienta y circula de forma natural o por presión del viento utilizando una fuente externa o combinación de ambos.

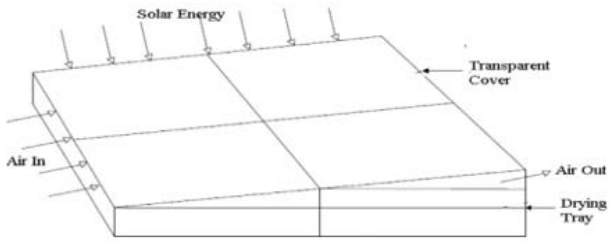


Figura 3. Secador solar directo [5]

El secador solar directo es de construcción simple y más barata que protege el producto de secado del polvo, lluvia, escombros, rocíos, etc.; también presenta algunos inconvenientes en su funcionamiento, como el sobrecalentamiento del producto, la calidad indeseable y la limitada capacidad de secado [6].

Tomar y Norton [7] desarrollaron un secado cultivo, compuesto por un calentador de aire solar y un secador de túnel para el secado de diversos productos agrícolas como se puede observar en la Figura 4. En comparación con los métodos tradicionales de secado solar, el tiempo de secado y las pérdidas masivas se redujeron significativamente con el período de amortización de 1-3 años. Por ejemplo, se informó que la energía necesaria para el secado de 1000 kg de uva varía de 11,2 a 23,0 kWh dependiendo de las condiciones climáticas con un costo entre 1,2 y 2,0 dólares estadounidenses, lo que fue absolutamente insignificante en comparación con la ganancia adicional. Sin embargo, la diseminación del sistema de secado solar a una zona determinada depende de la disponibilidad de electricidad y de sus necesidades.

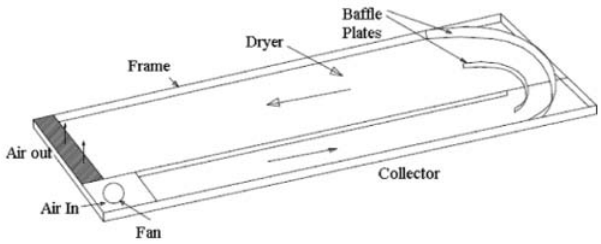


Figura 4. Secador de túnel solar [7]

Neama y Farkas [8] presentaron un estudio experimental para aumentar la eficiencia de secado del cultivo mediante el uso de una célula fotovoltaica. El secador alcanzó una temperatura de 76 °C y redujo el contenido de humedad de 50 a 60 %. La vista esquemática del secador solar con célula fotovoltaica se muestra en la Figura 5.

Ogheneruona and Yusuf [9] diseñaron y fabricaron un secador solar de convección natural directa de secado de tapioca y la reducción que se reportó en su contenido de humedad fue de 79 a 10 % en base húmeda en condiciones ambientales (32 °C y 74 % de humedad relativa).

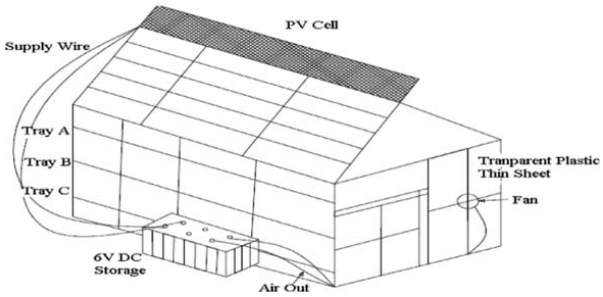


Figura 5. Secador solar fotovoltaico [9]

Tefera *et al.* [10] evaluaron el rendimiento del secador solar directo de madera y de forma piramidal para el secado de papa, lo que redujo el tiempo de secado general entre 2 y 3 horas en comparación con el secado por sol abierto. La secadora piramidal se observó mejor en la creación de un entorno de secado más propicio con una mejor viabilidad económica. De igual forma, Eke y Arinze [11] desarrollaron un prototipo de secador solar directo de convección natural de barro para el secado de maíz. Se observó que el contenido de humedad se redujo del 29 al 12 % sobre la base húmeda, logrando un 55 % de ahorro en tiempo de secado contra el secado al sol abierto. Se encontró que la eficiencia de secado de la secadora y el método de secado solar abierto era del 45,6 % y del 22,7 %, respectivamente.

Por lo tanto, los secadores solares directos son los dispositivos más utilizados para el secado de productos agrícolas y alimenticios. Se observa que la eficiencia media de secado de los secadores solares directos varía de 20 a 40 % dependiendo de los tipos de productos, el caudal de aire y la ubicación de secado. La calidad del producto obtenido por los secadores solares directos es aceptable y se puede mejorar mediante el uso de ciertos tipos de procesos químicos de pretratamiento.

2. Materiales y métodos

Para el estudio de caso se tomó como referencia la Finca León ubicada en la parroquia Vilcabamba, cantón Loja, la misma que cuenta con un secador solar parabólico (marquesina) compuesto por una estructura, estantería y seis camas de secado de 6 m^2, la cual será levantada planimétricamente para el diseño de los acoples modulares para su fácil movilización y construcción. Los equipos de medición utilizados para el levantamiento fueron flexómetro, medidor de distancia láser y goniómetro.

Los pasos a seguir en esta investigación fueron la toma de medidas reales, el levantamiento planimétrico en 3D, la conversión del levantamiento a un entorno real utilizando el *software* Rendering, el análisis de acoples modulares y la comparación gráfica de eficiencia del tiempo y el secado del café.

2.1. Extensión de la investigación

La investigación abarcó un período de cuatro meses (lapso comprendido entre junio y septiembre de 2019). La recopilación de datos e información de valor fue consultada en los siguientes documentos: i) NTE INEN 2507 [12], ii) Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-11 cap. 14 Energía Renovable [13].

2.2. Levantamiento planimétrico

Se presentan medidas de todos los componentes que conforman la marquesina como se indica en la Figura 6.

Figura 6. Marquesina previa a toma de medidas

Las medidas de la marquesina son de 3 m de alto, 3 m de ancho y 6 m de largo; consta de seis camas para el secado de café, siendo sus medidas de 1 m de ancho x 6 m de largo. En la Figura 7 y Figura 8 se indican las camas de secado de café situadas en la parte izquierda y derecha de la marquesina.

Figura 7. Camas para el secado de café ubicadas en la parte izquierda al interior de la marquesina

Figura 8. Camas para el secado de café ubicadas en la parte derecha de la marquesina

2.3. Adquisición de medidas reales

La adquisición de medidas reales concernientes a la marquesina en donde se evidencia la vista frontal (Figura 9), vista lateral derecha (Figura 10), vista lateral izquierda (Figura 11) y parte interna (Figura 12).

Figura 9. Vista frontal acotada

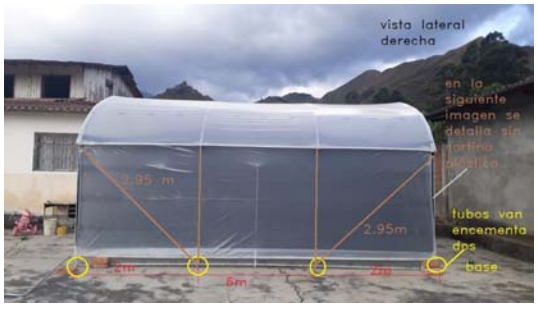


Figura 10. Vista lateral derecha acotada

Figura 11. Vista lateral izquierda acotada

Figura 12. Vista interna de marquesina

2.4. Levantamiento 3D

Para la toma de medidas de los diferentes componentes de la marquesina se procede a hacer el levantamiento en tres dimensiones, para ello se requiere un *software* interactivo y diferentes aplicaciones, tanto en el aprendizaje del dibujo técnico como en el análisis de ingeniería; se elige el SolidWorks [14]. A continuación, se detalla las vistas frontal (Figura 13), lateral derecha (Figura 14), superior (Figura 15) e isométrica (Figura 16).

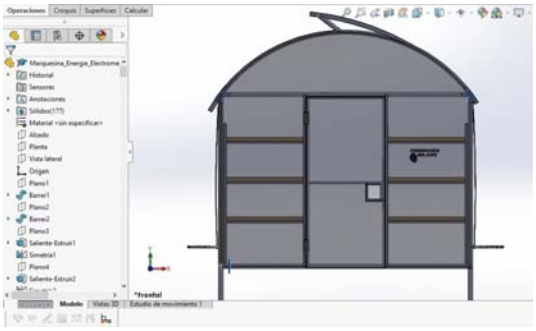


Figura 13. Vista frontal de la marquesina

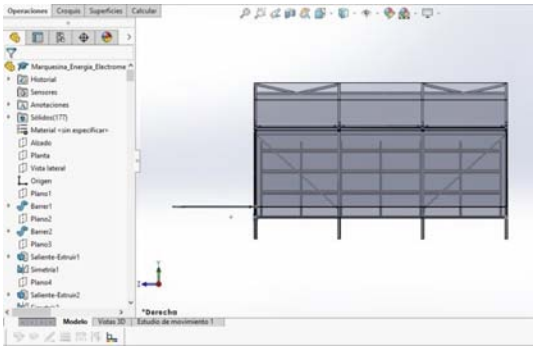


Figura 14. Vista lateral derecha de la marquesina

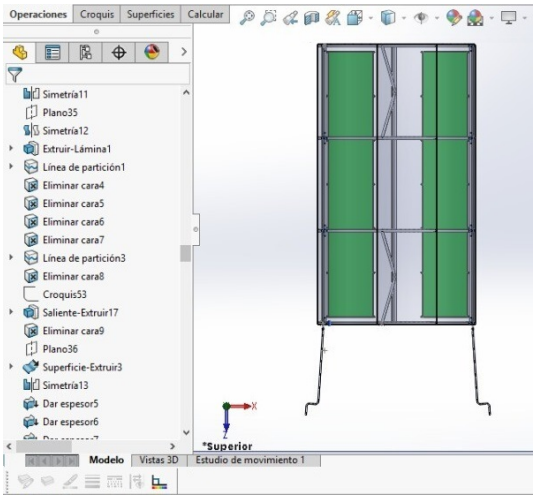


Figura 15. Vista superior de la marquesina

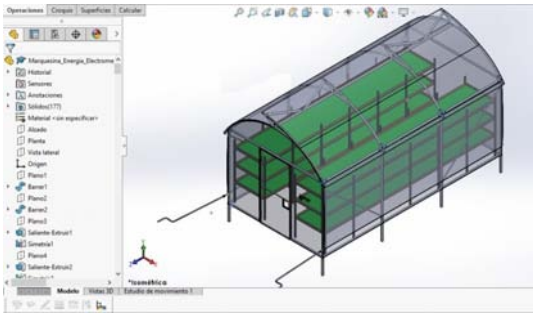


Figura 16. Vista isométrica realizada con el software SolidWorks

2.5. Presentación arquitectónica

Para un mejor acabado y proyección futura de prototipado a escala, se convierte el modelo realizado por SolidWorks a un entorno real utilizando el *software* Rendering [15] aplicado en el campo arquitectónico. Tanto en la Figura 17 como en la Figura 18 se presentan el diseño isométrico realizado por Rendering.

Figura 17. Marquesina diseñada por Rendering

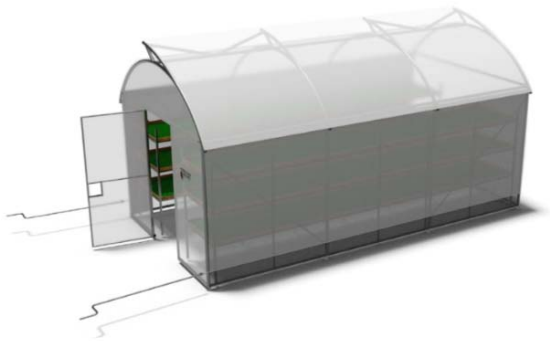


Figura 18. Vista isométrica de marquesina

2.6. Materiales y costos

Paralelo a la toma de medidas se realizó la revisión de los materiales que constituyen la marquesina. En la Tabla 1 se presentan los principales elementos.

Tabla 1. Materiales implementados en la marquesina

Materiales	Cantidad utilizada
Plástico invernadero	25 m
Malla Saran	24 m
Malla plástica verde 3/16”	12 m
Malla plástica antimosquito	24 m
Tubo redondo galvanizado 2”	54,76 m
Tubo redondo galvanizado 1”	21,19 m
Tubo cuadrado	28 m
Ángulos	83,4 m
Varilla corrugada 8	43,5 m
Cable de acero	60 m
Piola linga	254 m
Tiras de madera	83,4 m
Pernos hexagonales y tuercas	36 unidades

Los costos estimados de los materiales que se encuentran disponibles en el mercado nacional se indican en la Tabla 2.

2.7. Diseño experimental

Los resultados de los análisis y los gráficos referentes al tiempo y eficiencia de secado fueron obtenidos a partir del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV (Trial version 16.1.18) [16]. Para el diseño experimental fue utilizado un diseño factorial, de uno y varios factores. En el estudio térmico se establece la teoría de la eficiencia del colector de Duffie y Beckmen [17]. La Ecuación 1 se utiliza para el cálculo de eficiencia térmica de un invernadero, a continuación, se evidencia.

$$n_{empty} = \frac{C_p \dot{m}_a (T_0 - T_i)}{A_s I_s} \quad (1)$$

Donde n_{empty} es el porcentaje de eficiencia térmica del invernadero en vacío, C_p es el calor específico del aire (kJ/kg °C): $\dot{m}_a$, flujo de masa de aire; T_0, temperatura inicial del invernadero; T_i, temperatura final del invernadero; A_s área del invernadero e intensidad solar en la pared y techo del invernadero I_s.

Tabla 2. Costos de materiales empleados

Materiales	Presentación comercial	Valor estimado $
Plástico de invernadero	rollo de 200 m	106,25
Malla Saran	rollo de 30 m	182,4
Malla plástica verde de 3/16	rollo de 30 m	57,48
Malla plástica antimosquito Anti Trip	rollo de 100 m	79,92
Tubo redondo galvanizado	6 m	238,2
Tubo redondo galvanizado	6 m	35,8
Tubo cuadrado	6 m	35,8
Ángulo	6 m	161
Varilla corrugada de 8	6 m	38,4
Cable de acero	rollo de 75 m	33
Piola linga	rollo de 100 m	63,5
Tiras de madera	2 m	48
Pernos hexagonales y tuercas	perno de 2”	3,96
TOTAL		**$1083,71**

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de acople estructural

Las técnicas de ingeniería de *software* se utilizan para el modelado de sistemas, en especial el diseño y simulación de invernaderos de túnel. Conceptos tradicionales de tecnología orientada a objetos, se enfocan al desarrollo de *software* basado en componentes de ingeniería de*software*, similar al diseño basado en modelos, la especificación de los componentes y estándares, aplicando el uso de bibliotecas y la reutilización de estructuras de diseño [18], [19]. Todas estas técnicas son comunes en el diseño de invernaderos, tal como se indica en la Figura 19.

En las Figuras 20 y 21 se presenta la estructura de la marquesina realizada por SolidWorks, detallando el diseño de acople de armado en sus esquinas y en la parte posterior, indicando el tipo de tubo y sus especificaciones, con el fin de proporcionar un fácil acceso de armado y desarmado para su rápida movilización.

Cuando exista la necesidad de modelar invernaderos tipo multitúnel se aplican métodos que incluyen conceptos de reutilización, jerarquía de clases y

sucesión que permiten al usuario contar con diferentes aplicaciones tecnológicas, con el fin de construir una serie de bloques básicos para la fabricación de invernaderos, una vez que el diseño ya ha sido revisado. Desde este punto de vista, un invernadero no es más que una serie de bloques adaptados a un espacio, la eficiencia del uso del espacio constituye un punto crítico [20].

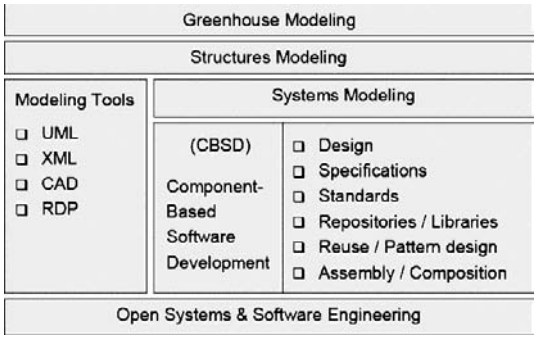


Figura 19. Algunas técnicas de ingeniería de *software* para el modelado de invernaderos [18]

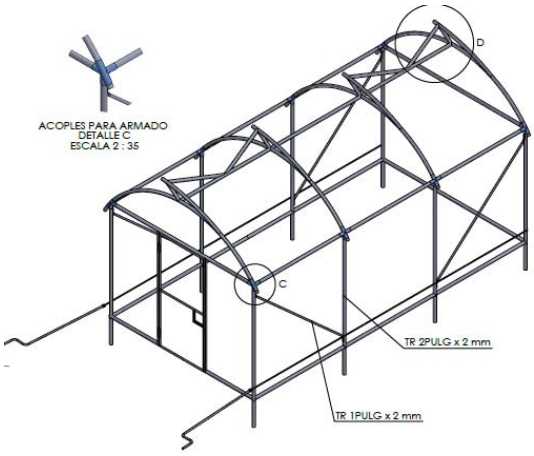


Figura 20. Acople de armado de marquesina

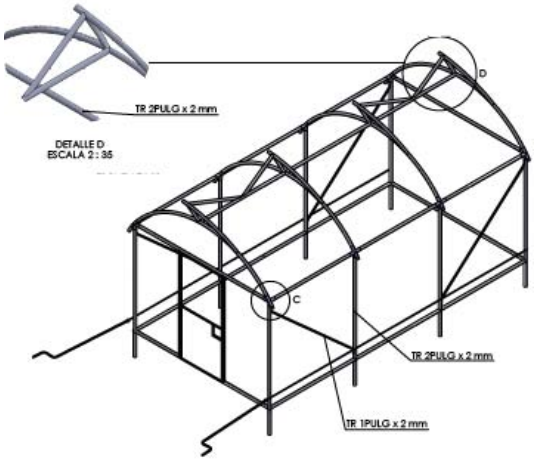


Figura 21. Detalle de la estructura

3.2. Análisis de la estantería

En la actualidad, el lenguaje de modelado unificado (UML) se utiliza en diferentes disciplinas de ingeniería para el modelado de sistemas, lo cual permite entender y describir la estructura y funcionamiento de un sistema en estudio; por ejemplo, el UML es utilizado en sistemas industriales: sector automovilístico [21], [22], teleoperación [20], robótica [22], [23], y sistemas de producción de monitoreo [24]. Por lo tanto, el UML ha sido empleado en el sector agrícola como técnica complementaria para el modelado de invernaderos.

Para el análisis de la estantería se usa la técnica del diseño asistido por computador (CAD), tal como se indica en la Figura 22, evidenciando la longitud y altura; en la Figura 23 se observa la separación de las camas de secado de café y el tipo de tubo empleado con sus especificaciones. Por último, en la Figura 24, se detalla una vista isométrica de la estantería comprendida por seis camas de secado y se especifica el material compuesto y sus dimensiones.

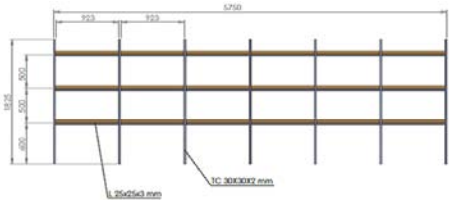


Figura 22. Dimensiones de las camas de secado de café

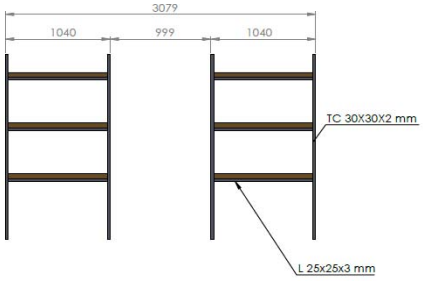


Figura 23. Distancia entre columnas de camas de secado

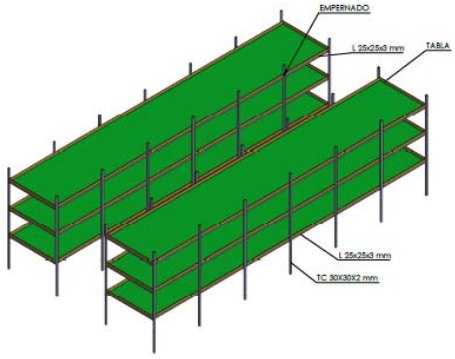


Figura 24. Vista isométrica de estantería y sus especificaciones

3.3. Análisis humedad – tiempo secado de café

Para estimar la relación humedad y tiempo de secado del café se procede a realizar un análisis estadístico de regresión lineal por la poca curvatura que presentan las gráficas en la Figura 25, situando la humedad (%) como variable dependiente y el tiempo de secado (días) como variable independiente. La Figura 25 indica la gráfica del modelo de ajuste, humedad – tiempo de secado, estableciendo las Ecuaciones 2 y 3, como el modelo ajustado.

$$Y = a + b \times X \tag{2}$$

$$Humedad = 50,7786 + 5,79048 \times tiempo\ de\ secado \tag{3}$$

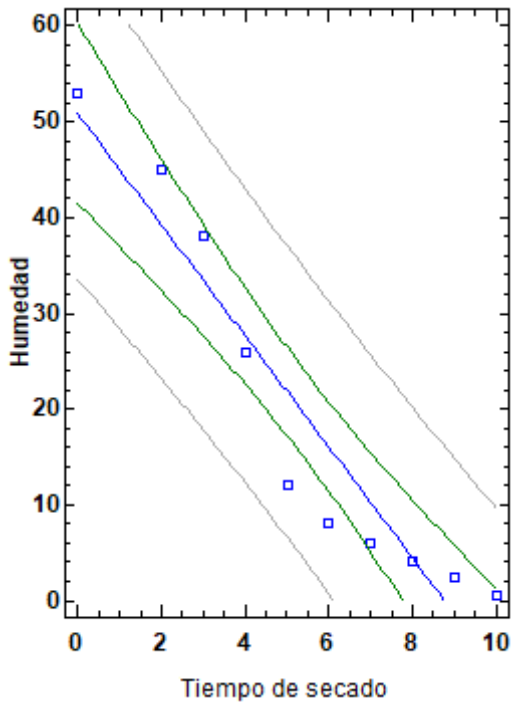


Figura 25. Gráfica del modelo ajustado humedad – tiempo de secado

La Tabla 3 presenta los coeficientes de relación humedad – tiempo de secado, donde se evidencia los parámetros estimados y erróneos del secado de café.

Tabla 3. Coeficientes, humedad–tiempo de secado

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	50,7786	4,05208	12,5315	0
Pendiente	–5,79048	0,653902	–8,85527	0

Según el análisis estadístico se presenta los siguientes valores:

- Coeficiente de correlación = –0,952588
- R-cuadrada = 90,7424 %
- R-cuadrado, (ajustado para g. l.) = 89,5852 %
- Error estándar del est. = 6,28562
- Error absoluto medio = 4,83571
- Estadístico Durbin-Watson = 0,587605 (P = 0,0005)
- Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,60396

En la Tabla 4 se indica el valor-P menor que 0,05, lo cual existe una relación estadística significativa entre humedad y tiempo de secado con un nivel de confianza del 95,0 %.

Tabla 4. Análisis de varianza humedad-tiempo de secado del café

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3098,14	1	3098,14	78,42	0,0000
Residuo	316,073	8	39,5091		
Total	3414,21	9			

El parámetro estadístico R-Cuadrada indica el modelo ajustado, exponiendo el 90,7424 % de variabilidad en la humedad, por consiguiente, el coeficiente de correlación es igual a –0,952588, que indica una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es de 6,28562 y el error absoluto medio es de 4,83571, al ser el valor promedio de los residuos.

El análisis estadístico de Durbin-Watson (DW) indica los residuos con el fin de determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en los datos recogidos.

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0 %, esto es que a menor tiempo de secado en el invernadero, mayor será el mayor porcentaje de humedad.

3.4. Análisis área de secado – producción

En lugares donde el secado solar posee producciones menores de 500 arrobas de café pergamino seco al año, suelen ocupar sitios de secado como elbas o casa elbas, marquesinas o secadores parabólicos [25]. La Tabla 5 presenta un resumen estadístico detallando el promedio de las muestras y su desviación estándar. Hay que tener en cuenta que existe una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar más pequeña y la más grande. Esto puede causar problemas puesto que el análisis de varianza asume que la desviación estándar de todos los niveles es igual, por lo tanto, la producción de café en quintales posee una producción creciente.

Tabla 5. Resumen estadístico del área de secado y producción

	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coef. de variación	Mín.
Área de secado	8	63	51,8129	82,2426%	12,0
Producción	8	210	172,71	82,2426%	40,0
Producción en quintales	8	48,75	44,7014	91,6952%	10,0
Total	24	107,25	126,677	118,1140%	10,0

La Tabla 6 presenta una tabla ANOVA, la cual descompone la varianza de los datos en dos componentes: uno entre grupos y otro dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 5,54178, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos, puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05; existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres variables con un nivel del 95,0 % de confianza, por lo tanto, son muestras estadísticas válidas y acertados en la producción de café.

Tabla 6. Tabla Anova

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	127503	2	63751,5	5,54	0,0117
Intragrupos	241580	21	11503,8		
Total (Corr.)	369083	23			

La Tabla 7 muestra la media para cada columna de los datos obtenidos y el error estándar de cada media, la cual es una medida de la variabilidad del muestreo. El error estándar indica un resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. Además, también señala una muestra de intervalo alrededor de cada media.

Tabla 7. Tabla de medias con intervalos de confianza del 95,0 %

	Casos	Media	Error Est. (s) Agrupada	Límite inferior	Límite superior
Área de secado	8	63	37,9206	7,23727	118,763
Producción	8	210	37,9206	154,237	265,763
Producción en quintales	8	48,75	37,9206	–7,01273	104,513
Total	24	107,25			

Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher; construidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0 % de las veces, lo que se puede observar gráficamente en la Figura 26.

La Figura 27 indica la relación del área de secado con la producción en arrobas de café pergamino secado; presenta que en un área de secado de 18 m^2 de la marquesina se puede producir alrededor de 1500 kg anuales.

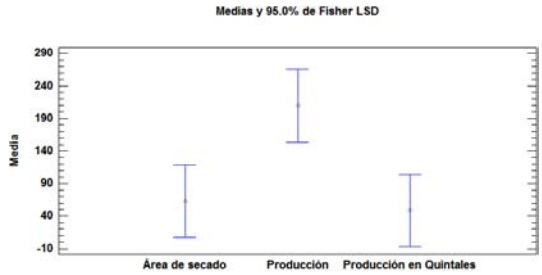


Figura 26. Gráfico de medias y del 95 % de Fisher LSD

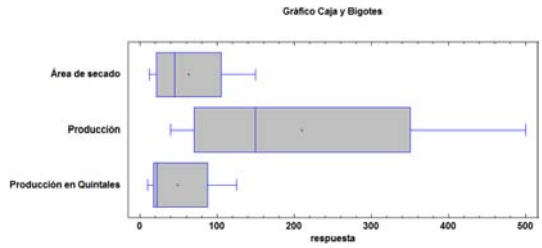


Figura 27. Gráfico de caja y bigotes relación área – producción

3.5. Campo direccional del flujo de calor en el interior de la marquesina

Al considerar la ley de Newton para estudiar el efecto con que un cuerpo alcanza la temperatura interna, como es el caso del grano de café en el interior de la marquesina, consideramos la temperatura T del grano de café y T_a la temperatura del ambiente. La Ecuación 4 se emplea para el estudio del campo de direcciones de flujo de calor en el interior de la marquesina.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K(T - T_a) \tag{4}$$

La constante K es la conductividad térmica del medio, considerando un ambiente controlado de $0,02\left[\frac{W}{Km}\right]$. La condición inicial de nuestro problema será $T(t_0) = T_0$. La solución particular de la Ecuación para el tiempo $t_0 = 0$. (Ecuación 5).

$$T(t) = (T_a - T_0) \cdot e^{Kt} + T_a \tag{5}$$

De los datos medidos de temperatura en el interior de marquesina se estableció una $T_a = 82$L, considerando que no existen pérdidas adiabáticas para el análisis. La representación del campo de direcciones para la Ecuación diferencial ordinaria continua autónoma (Ecuación 6, Ecuación 7) se la puede representar en la Figura 28, empleando un conjunto de mallados de puntos. Se aprecia un punto de equilibrio a la temperatura ambiente en el interior de la marquesina. También se tiene que los puntos por debajo de este se comportan como puntos a tractores que tienen un crecimiento exponencial.

$$Tv = \begin{bmatrix} t \\ T \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$T_{dor} = \begin{bmatrix} t \\ T \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} 1 \\ K(T - T_a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ K(Tv(2)) \end{bmatrix} \tag{7}$$

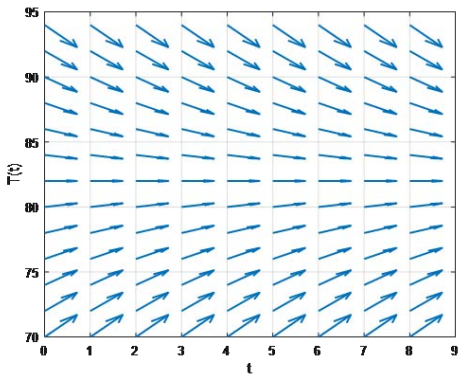


Figura 28. Gráfico del campo de direcciones para la dirección de calor en el interior de la marquesina.

4. Conclusiones

El uso de la marquesina se aplica al secado de productos agrícolas, destacando el secado de café, debido a su gran potencial desde el punto de vista experimental y ahorro energético. Existen varios tipos de secadores solares que han sido diseñados y desarrollados en algunos sectores agroindustriales, produciendo diferentes grados de rendimiento técnico. Los acoples modulares realizados después del levantamiento planimétrico han permitido mejorar su movilidad y adaptabilidad.

Los valores obtenidos referentes a la relación humedad y tiempo de secado del café, presentaron un análisis estadístico de regresión lineal, situando la humedad como variable dependiente y el tiempo de secado como variable independiente dando como resultado un modelo ajustado, mostrando una disminución de humedad asociado con un aumento de secado. En el análisis de varianza de la humedad con respecto al secado del café se obtuvo un valor-P menor que 0,05, lo que significa que existe una relación estadística significativa entre humedad y tiempo de secado con un nivel de confianza del 95,0 %.

En el análisis de producción con relación al área de secado se realizó un resumen estadístico a base de un promedio de muestras y desviación estándar, se obtuvo una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar más pequeña y la más grande, la cual se asume que las desviaciones estándar de todos los niveles son iguales, aportando un crecimiento en la producción de café. Se realizó una varianza de los datos en dos componentes: entre grupos y dentro de grupos, dando una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres variables con un nivel del 95,0 % de confianza, indicando que los datos obtenidos son muestras estadísticas válidas y convenientes en la producción de café.

Los intervalos de humedad y área de secado indican la relación de área de secado con la producción en arrobas de café pergamino secado, para un área de secado de 18 m^2 existe la capacidad de producir quince quintales, anualmente.

Referencias

[1] ICO, *Anuario 2017–2018*. International Coffee Organization, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/36fPT1G

[2] K. Jitjack, S. Thepa, K. Sudaprasert, and P. Namprakai, “Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels,” *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 178–193, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.030

[3] C. E. Oliveros-Tascón, C. A. Ramírez-Gómez, and J. R. Sanz-Uribe, “Secador solar de túnel para café pergamino,” *Avances Técnicos Cenicafé*, pp. 1–8, 2006. [Online]. Available: https://bit.ly/3cNt2NG

[4] M. Kumar, S. K. Sansaniwal, and P. Khatak, “Progress in solar dryers for drying various commodities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 346–360, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158

[5] A. Ghazanfari, L. Tabil Jr., and S. Sokhansanj, “Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts,” *Drying Technology*, vol. 21, no. 7, pp. 1357–1368, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1081/DRT-120023183

[6] M. E.-A. Slimani, “Etude d’un séchoir solaire agricole muni d’un capteur solaire de type "pv-therm": réalisation d’un prototype et caractérisation,” Ph.D. dissertation, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/2LQNzVr

[7] V. Tomar, G. N. Tiwari, and B. Norton, “Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components,” *Solar Energy*, vol. 154, pp. 2–13, 2017, solar Thermal Heating and Cooling. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.066

[8] M. Al-Neama and I. Farkas, “Utilization of solar air collectors for product’s drying processes,” *The Journal of Scientific and Engineering Research*,

vol. 5, no. 2, pp. 40–56, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/3eaPDUJ

[9] D. E. Ogheneruona and M. O. L. Yusuf, "Design and fabrication of a direct natural convection solar dryer for tapioca design and fabrication of a direct natural convection solar dryer for tapioca," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 10, no. 18, pp. 95–104, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/3bMGqQz

[10] A. Tefera, W. Endalew, and B. Fikiru, "Evaluation and demonstration of direct solar potato dryer," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 25, no. 12, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/2LN8Lf4

[11] R. Patil and R. Gawande, "A review on solar tunnel greenhouse drying system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 196–214, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.057

[12] INEN, *NTE INEN 1757 Frutas frescas, limón, requisitos.* Norma Técnica Ecuatoriana, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/2XtNXPt

[13] MIDUVI, *NEC-11. Energías Renovables.* Norma Ecuatoriana de la Construccón, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/2XdaEqY

[14] Dassault Systemes. (2019) SOLIDWORKS. [Online]. Available: https://bit.ly/2XdakZf

[15] Rendering. (2019) Rendering, rendering 3d, rendering animation. [Online]. Available: https://bit.ly/3e2eUQK

[16] R. García, *Curso básico de STATGRAPHICS Version 5.0*, 2005. [Online]. Available: https://bit.ly/2ZjCB2Z

[17] J. A. D. W. A. Beckman, *Solar Thermal Power Systems.* John Wiley & Sons, Ltd, 2013, ch. 17, pp. 621–634. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/9781118671603

[18] G. T. Heineman and W. T. Councill, *Component-based Software Engineering: Putting the Pieces Together.* ACM Press series, 2001. [Online]. Available: https://bit.ly/2zjQfs2

[19] L. Iribarne, J. M. Troya, and A. Vallecillo, "A trading service for cots components," *The Computer Journal*, vol. 47, no. 3, pp. 342–357, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1093/comjnl/47.3.342

[20] L. Iribarne, J. A. Torres, and A. P. na, "Using computer modeling techniques to design tunnel greenhouse structures," *Computers in Industry*, vol. 58, no. 5, pp. 403–415, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compind.2006.09.001

[21] S. H. Kong, S. D. Noh, Y.-G. Han, G. Kim, and K. I. Lee, "Internet-based collaboration system: Press-die design process for automobile manufacturer," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 701–708, Oct. 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s001700200209

[22] K. L. Mills and H. Gomaa, "A knowledge-based method for inferring semantic concepts from visual models of system behavior," *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 9, no. 3, pp. 306–337, Jul. 2000. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/352591.352594

[23] M. Wirsing, A. Knapp, and S. Balsamo, *Radical Innovations of Software and Systems Engineering in the Future.* 9th International Workshop, RISSEF 2002, Venice, Italy, October 7-11, 2002, Revised Papers. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/b96009

[24] M. Ghazel, A. Toguyéni, and M. Bigand, "An uml approach for the metamodelling of automated production systems for monitoring purpose," *Computers in Industry*, vol. 55, no. 3, pp. 283–299, 2004, object-oriented modelling in design and production. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.08.005

[25] Cenicafé, "Secado del café pergamino," *Cenicafé*, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/2zZwRk0

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.05
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Control de un sistema de energía basado en volantes de inercia para mitigar los huecos de tensión en el punto de conexión común

Control of a System of Energy based on Flywheel to mitigate the Voltage Gaps at the Point of Common Coupling

Carlos Orellana Uguña[1,*], Luis González Morales[2], Nuno Abreu Sousa[3]

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un sistema de energía basado en volante de inercia para mitigar los huecos de tensión. Con el sistema se mejora la calidad de energía en un punto de una red de distribución, el cual está expuesto a la conexión aleatoria de máquinas eléctricas. Para ello, se modela el sistema de distribución de energía, el sistema de inyección de energía que está compuesto por una máquina eléctrica con volante de inercia, el sistema de conversión de energía bidireccional y el sistema de control de corriente, voltaje y velocidad. El sistema diseñado permite inyectar una potencia de 22.8 kW y capacidad de 1.2 Wh, compensando los transitorios producidos por las cargas conectadas a la red.

Palabras clave: baterías, volante de inercia, AC/DC, DC/AC, PCC

Abstract

This article presents the design of a power system based on flywheel to mitigate voltage sags. With this system the power quality is improved at a point in a distribution network, which is subject to the random connection of electric machines. For this purpose, the power distribution system is modeled, the power supply system which is composed of an electric machine with flywheel, the bidirectional energy conversion system and the current, voltage and speed control system. The designed system enables supplying a power of 22.8 kW and capacity of 1.2 Wh, compensating the transients produced by the loads connected to the network.

Keywords: Batteries, flywheel, AC/DC, DC/AC, PCC.

[1,*]Instituto Tecnológico Superior Luis Rogerio González, Azogues – Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: carl.mauryou@yahoo.es. http://orcid.org/0000-0001-7214-4060
[2]Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones (DEET), Universidad de Cuenca, Cuenca – Ecuador. http://orcid.org/0000-0001-9992-3494
[3]Departamento de Engenharia Electrotécnica da Escola Superior de Tecnologia e Gestãodo Instituto Politécnico de Leiria - Portugal. http://orcid.org/0000-0002-3837-0547

Recibido: 22-01-2020, aprobado tras revisión: 19-05-2020

Forma sugerida de citación: Orellana Uguña, C.; González Morales, L. y Abreu Sousa, N. (2020). «Control de un sistema de energía basado en volantes de inercia para mitigar los huecos de tensión en el punto de conexión común». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 49-58. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.05.

1. Introducción

La empresa distribuidora de energía eléctrica, al ser la entidad que suministra energía a los consumidores, basándose en normas establecidas, tiene la obligación de mantener la calidad de energía entregada, la que se puede estimar mediante la continuidad de servicio y la calidad de la onda de tensión.

Para llevar a cabo este objetivo se implementaron diferentes estrategias de respaldo de energía en los sistemas eléctricos de potencia, las cuales buscan mejorar la calidad y estabilidad de la energía [1]. Estos sistemas pueden ser clasificados por su tiempo de descarga [2] como se indica a continuación:

> Tiempo de descarga de segundos a minutos: son usados para mejorar la calidad de energía. Los tiempos de descarga son de 10 minutos con respuestas de milisegundos. En este tipo se encuentran los supercondensadores con potencias de hasta 1 MW y los volantes de inercia con potencias entre 10 kW y 1 MW.
>
> Tiempo de descarga de minutos a una hora: son usados como puentes de potencia, es decir, aseguran la confiabilidad de la fuente de alimentación a los clientes, poseen respuestas de segundos a minutos con tiempos de descargas de hasta 1 hora, con potencias entre 1 kW y 10 MW. En este tipo figuran las baterías electroquímicas.
>
> Tiempo de descarga de horas: se utiliza para gestión de la energía, en este tipo se encuentra el almacenamiento hidráulico por bombeo y por aire comprimido, con potencias entre 100 MW y 1 GW respectivamente y el almacenamiento de energía térmica con capacidades de almacenamiento entre 10 MW y 100 MW.

Independientemente de la tecnología utilizada se debe considerar aspectos como: gastos operativos y constructivos, tiempo de vida útil, tiempo de respuesta ante una perturbación en la red, limitaciones geográficas y propiedades físicas del mismo [3].

Si se consideran las limitaciones geográficas se descartan los sistemas de almacenamiento por bombeo, pues requieren de dos depósitos que se encuentren a diferentes niveles, debido a que la energía almacenada es proporcional al volumen del líquido y a la diferencia de altura entre los depósitos, limitando así su instalación solo a lugares con características no planas. No se opta por el aire comprimido debido a que requiere cavernas subterráneas con características muy resistentes, pues albergan aire a gran presión y, finalmente, se descarta el almacenamiento de energía térmica debido a que el principio de funcionamiento de cada uno de ellos depende de la temperatura ambiente en la cual va a trabajar.

Como resultado quedan las baterías electroquímicas, los volantes de inercia y los supercondensadores [2].

Las baterías electroquímicas presentan desventajas, tales como: al finalizar su vida útil y al no poseer una infraestructura adecuada de reciclaje contamina el medioambiente [4], su vida útil depende del ambiente de trabajo y del número de cargas/descargas y, lo más importante, no pueden cargarse ni descargarse rápidamente debido a que poseen una resistencia interna grande [5]. Debido a ello queda como resultado la utilización de los volantes de inercia que presentan las siguientes ventajas: tienen un mayor ciclo de cargas/descargas con potencia media a alta (kW a MW) durante cortos periodos (segundos) sin afectar su vida útil [6], alta capacidad de respuesta, es amigable con el ambiente pues no requiere de reacciones químicas, no necesita de condiciones geográficas especiales para su construcción [7]. El principal competidor en términos comparativos que tienen los volantes de inercia son los supercondensadores, los cuales de igual manera presentan las siguientes ventajas sobre las baterías electroquímicas: pueden cargarse/descargarse en períodos cortos (segundos), pueden proporcionar corrientes de cargas altas, poseen un ciclo de vida del orden de millones de veces, trabajan en condiciones de temperaturas muy duras, no poseen en su estructura elementos tóxicos [2].

En este trabajo se pretende realizar el estudio sobre el diseño de un sistema de inyección de energía basado en volantes de inercia para mitigar los huecos de tensión en el punto de conexión común de un sistema eléctrico de distribución. Para ello se modelará el volante de inercia con su sistema de control y la red de distribución. El diseño es aplicado para una zona rural con explotación minera y agrícola que presenta cargas del tipo máquinas eléctricas, usando el PSIM® como herramienta de simulación.

1.1. Descripción del problema

Debido al incremento de cargas conectadas al punto de conexión común (PCC) perteneciente a la zona con vocación minera y agrícola de estudio, la calidad del suministro de energía disminuye, por las características del sistema de distribución existente y la continua puesta en marcha de las máquinas eléctricas de gran capacidad, sin contar con los arrancadores suaves que contribuyen a la formación de huecos de tensión. El caso de estudio abarcará al cantón Pucará y sus alrededores, específicamente el caserío San Juan de Naranjillas perteneciente a la provincia del Azuay, Ecuador, la cual es abastecida por el alimentador 1424 de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Debido a la falta de existencia de normativas técnicas que regulen la potencia de los motores utilizados en las diferentes actividades mineras/agrícolas, se consideró como referencia las maquinarias utilizadas en una

principal minera denomina TRES CHORRERAS, que establece la utilización de motores Allis Chalmers de 32 HP, en función de ello y según catálogos disponibles en el Ecuador se utiliza motores eléctricos W21 a Prueba de Explosión NEMA Premium Efficiency de 50 HP que dan movimiento a bombas centrífugas para el manejo de líquidos, trituradoras, cintas transportadoras entre otras [8].

Las características de los motores a utilizar se indican en la Figura 1 [9].

El modelo de simulación para la red de distribución se indica en la Figura 1, con resistencias de 20 Ω que emulan pequeños aparatos eléctricos distribuidos en cada una de las fases (iluminación, electrodomésticos).

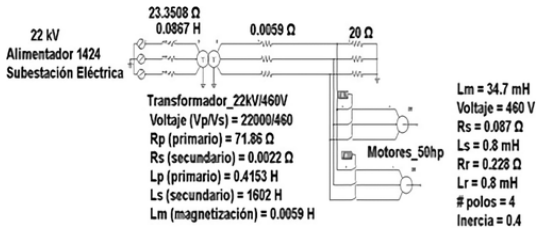


Figura 1. Modelo de la red de distribución y características de los motores de 50 Hp

1.2. Calidad de energía

Uno de los aspectos importantes relacionados con la calidad de energía son los llamados huecos de tensión *sag* descritos en detalle en las normativas técnicas IEEE 1159, CONELEC 004/01 y NP EN 50160-2010, las cuales lo definen como una disminución de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 10 % y el 90 % de la tensión nominal. Además, las normas definen a la elevación de tensión *swell* como una elevación de tensión de alimentación a un valor situado entre el 110 % y 180 % de la tensión nominal, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Aplicando este criterio al nivel de tensión fase-neutro del lado secundario del transformador de la Figura 1, el rango para la formación de los *sags* está comprendido entre 26,55 V y 238,95 V y para el *swell* entre 292,05 V y 477,9 V, resultando así un rango permisible de 238,95 V hasta 292,05 V.

A continuación, se describirán los métodos utilizados en este trabajo de investigación para mitigar la formación de los huecos de tensión.

2. Materiales y métodos

2.1. Propuesta del sistema de energía para mitigar los huecos de tensión en el punto de conexión común

El modelo en diagrama de bloques que este estudio propone para mitigar los huecos de tensión en el PCC está indicado en la Figura 2, el cual está compuesto por una máquina eléctrica con volante de inercia, dos convertidores trifásicos de potencia controlados y un condensador de acoplamiento denominado DC-link.

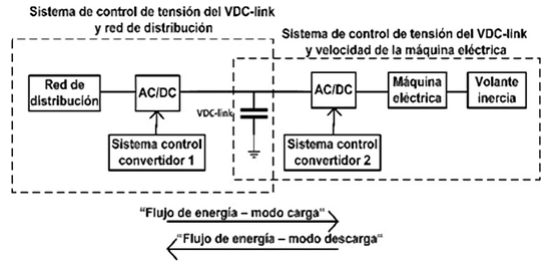


Figura 2. Sistema basado en volante de inercia para mitigar los huecos de tensión en el PCC

En la Figura 2, el modelo propuesto consta de las siguientes etapas de control:

Sistema de control 1: el convertidor de potencia asociado a la red de distribución consta de un control de corriente en el sistema de referencia síncrono como el utilizado en [10], [11]. Su tarea es controlar la tensión de la red de distribución y la tensión DC-link. Este control se puede dividir en dos subetapas: *modo carga*, la energía fluye desde la red de distribución hacia el bus de continua para alcanzar el nivel de tensión nominal del $V_{DC-link}$. En este modo, opera el sistema de control de tensión del $V_{DC-link}$ usando al convertidor como un rectificador trifásico controlado. En *modo descarga*, la energía fluye desde el bus de continua hacia la red distribución, en este modo, opera el sistema de control de tensión de la red de distribución usando al convertidor como un inversor trifásico controlado.

Sistema de control 2: el convertidor de potencia asociado a la máquina eléctrica consta de un control de corriente en el sistema de referencia síncrono. Este sistema de control se puede dividir en dos subetapas: *modo carga*, la energía fluye desde la fuente de tensión $V_{DC-link}$ hacia la máquina eléctrica que está funcionando como motor para alcanzar la velocidad nominal de carga, en este modo, opera el sistema de control de velocidad de la máquina eléctrica usando al convertidor como un inversor trifásico controlado. En este estado, el sistema tiene almacenada su energía en forma cinética. En *modo descarga*, la energía fluye desde la máquina eléctrica funcionando como generador hacia la fuente $V_{DC-link}$ para mantener su nivel de tensión en un valor de referencia ante la presencia de cualquier carga conectada a la red de distribución. En este modo opera el sistema de control de tensión del circuito intermedio $V_{DC-link}$, usando al convertidor como un rectificador trifásico controlado.

El cambio de los modos de control está sujeto al estado de la tensión en el PCC; en este sentido, cada uno de los convertidores de potencia operará de forma AC/DC o DC/AC.

A continuación, se describen los lazos de control que conforman el sistema de inyección de energía basado en volante de inercia.

2.1.1. Sistema de control 1, perteneciente al control de la tensión de la red de distribución y tensión del $V_{DC-link}$.

El sistema de control 1, cuenta con una estructura definida por el modo de operación carga o descarga. La Figura 3 indica en forma de diagrama de bloques el sistema de control en cascada.

Por el nivel de tensión que soportan el convertidor trifásico SKiM459GD12E4 y el condensador de acoplamiento U37F tipo E37F501CPN103MFK0M, se establece como referencia un nivel de tensión de 900 Vcd para el $V_{DC-link}$.

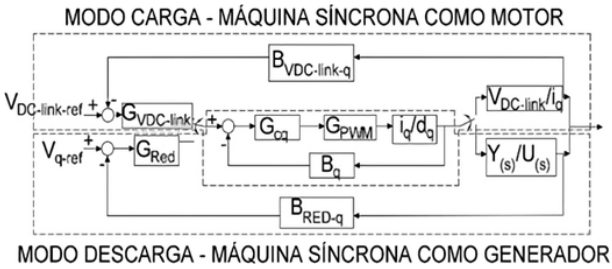


Figura 3. Lazos de control para la tensión de la red de distribución y del $V_{DC-link}$

De la Figura 3, B_q, B_{Red-q}, $B_{VDC-link}$ son las ganancias asociadas a las mediciones de corriente, de tensión de la red de distribución y de la tensión del $V_{DC-link}$ respectivamente con valores unitarios, G_{cq}, $G_{VDC-link}$, G_{RED} son las funciones de transferencia de los controladores, que en esta aplicación se han utilizado controladores clásicos de configuración proporcional e integral (PI), G_{PWM} es la ganancia del PWM, que en este caso se ha utilizado con ganancia unitaria, $\frac{Y(s)}{U(s)}$ representa la función de transferencia que relaciona la tensión de la red de distribución con respecto a la corriente en el eje de cuadratura, $\frac{V_{DCl\,ink}}{\tilde{i}_q}$ constituye la función de transferencia que relaciona la tensión del $V_{DC-link}$ con respecto a la corriente en el eje de cuadratura.

El modelado del convertidor de potencia puede tratarse mediante la Ecuación (1), como es utilizada en [10], [11].

$$\frac{\tilde{i}'_{d(s)}}{\tilde{d}'_{d(s)}} = \frac{\tilde{i}'_{q(s)}}{\tilde{d}'_{q(s)}} = \frac{V_0}{Ls' + R_s} \tag{1}$$

Para los parámetros involucrados en la Ecuación (1), se considera lo siguiente:

V_0 es la tensión del $V_{DC-link}$, en el presente trabajo se ha definido en un valor de 900 V.

L es la inductancia del filtro de entrada de acuerdo con [12]. Para el cálculo se procede de la siguiente manera: se considera que la reactancia inductiva es igual al 10 % de la resistencia base [10], resultando entonces $Xl = 0,565\ \Omega$, por tanto, $L = 1,5\ mH$. A partir de este valor inicial se calibra el valor del filtro L hasta llegar a un valor de 7 mH, con el cual la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) se encuentra dentro de la norma NP EN 50160-2010, Conelec 004/01 (menor al 8 %).

R_s de acuerdo con [12] está asociada a las pérdidas de los elementos pasivos y semiconductores que existe en el convertidor.

s' es el operador de Laplace.

De igual manera, se cumplen las ecuaciones del balance de energía asociada al condensador del bus de continua que puede representarse mediante las Ecuaciones (2) y (3) [10].

$$\frac{V_{DC_link}}{\tilde{i}_q} = \frac{D_q}{Cs' + \frac{I_0}{V_{DC_link}}} \tag{2}$$

$$D_q = \frac{2\sqrt{2}V_{f-n}}{V_{DC_link}} \tag{3}$$

Dónde: D_q es el índice de modulación, C es la capacitancia total de los condensadores que conforman el bus de continua, I_0 es la corriente que circula desde el puente rectificador hacia el bus de continua, $V_{DCl\,ink}$ es la tensión del bus de continua, s' es el operador de Laplace.

En el caso del *modo descarga*, el convertidor de potencia controlado mediante los lazos de corriente en el eje directo y cuadratura es utilizado para el control de la tensión en la red de distribución mediante la función de transferencia $\left(\frac{Y(s)}{U(s)}\right)$ que para efecto del diseño del sistema de control se ha caracterizado a una aproximación de un sistema de primer orden. Para encontrar los parámetros que constituyen dicha función de transferencia se considera que el sistema basado en el volante de inercia va a estar conectado en paralelo a la red de distribución comportándose como fuente de corriente. De forma gráfica, la Figura 4 muestra el esquema para determinar la función de trasferencia antes descrita mediante la respuesta escalón.

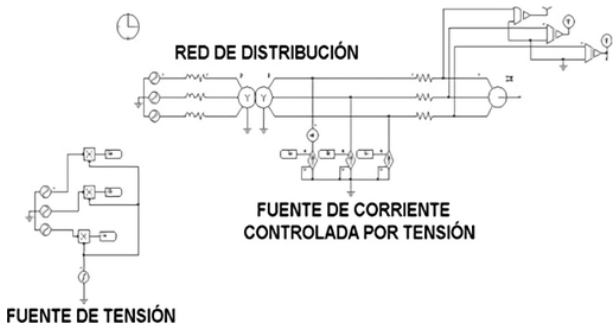


Figura 4. Modelo para la función de transferencia que relaciona la tensión en el PCC con la inyección de corriente en fase

Al aplicar el procedimiento antes descrito, el comportamiento de la tensión en la red de distribución ante una perturbación de corriente con amplitud de $\Delta I = 400\ A$, resulta en $\Delta V = 51,6\ V$, obteniendo una función de transferencia como la que observa en la Ecuación (4).

$$\frac{Y_{(s)}}{U_{(s)}} = \frac{0,129}{0,287s' + 1} \tag{4}$$

Es importante destacar que las corrientes que se inyecten desde el sistema de almacenamiento de energía hacia el PCC deben tener un sistema de sincronización de fase para alcanzar el control de la energía activa o reactiva. En este diseño se ha utilizado un sistema de enganche de fase PLL normalizado como el utilizado en [10].

2.1.2. Sistema de control 2, perteneciente al control de la velocidad de la máquina eléctrica y la tensión del $V_{DC-link}$.

La máquina eléctrica utilizada en el presente trabajo es una máquina síncrona de imanes permanentes debido a que presenta algunas ventajas sobre las de inducción, entre las cuales están: alta eficiencia, excelente densidad de potencia, buena relación par mecánico/corriente, tamaño pequeño [13]. Lo que se destaca en las máquinas síncronas es que la velocidad del rotor es igual a la velocidad del flujo del rotor. Por tanto, θ_1 (ángulo necesario para la transformada de Park) se mide directamente mediante sensores de posición o mediante la integración de la velocidad del rotor [14].

Para el control de la velocidad de la máquina síncrona se utilizó el control de campo orientado, FOC, el cual permite desacoplar el par mecánico y las componentes de flujo de magnetización, debido a la facilidad de poder controlar de forma independiente la corriente i_{sd} (asociada al flujo magnético de la máquina) e i_{sq} (asociada al par mecánico ejercida por la máquina), esto gracias a su característica de rotor liso ($L_d = L_q$) [10].

El modelo matemático de la máquina síncrona de imanes permanentes en el sistema de referencia síncrono es expresado por las Ecuaciones (5) y (6).

$$V_d = R_s I_d - wL_q I_q + L_d \frac{dl_q}{dt} \tag{5}$$

$$V_q wL_d I_d + R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \lambda_m \frac{\sqrt{6}}{2} w \tag{6}$$

Donde: w es la velocidad angular eléctrica en (rad/s); λ_m es el flujo de los imanes permanentes, L_q y L_d son las inductancias de la máquina en el eje síncrono de cuadratura y directo, respectivamente en (H); R_s es la resistencia estatórica de la máquina síncrona en (Ω).

La potencia efectiva y el par son expresados por las Ecuaciones (7) y (8).

$$P_e = w\left[(L_d - L_q)I_q I_d + \lambda_m I_q \frac{\sqrt{6}}{2}\right] \tag{7}$$

$$T_e = p\left[(L_d - L_q)I_q I_d + \lambda_m I_q \frac{\sqrt{6}}{2}\right] \tag{8}$$

Dónde: p es el número de polos de la máquina síncrona.

La relación que existe entre la velocidad angular del rotor y la corriente referida al eje de cuadratura, es expresada por la Ecuación (9).

$$\frac{dw_r}{dt} + Bw_r = p\lambda_m I_q \frac{\sqrt{6}}{2} \tag{9}$$

Donde: J es el momento de inercia en ($kg \cdot m^2$), B es el coeficiente de fricción en ($N \cdot m \cdot s$) y w_r es la velocidad angular mecánica.

La relación de la corriente en estado estable en el eje de cuadratura y la tensión del condensador del bus de continua se relacionan mediante la Ecuación (10).

$$I_{qs} = \frac{V_{DC_link} I_{dc}}{p\lambda_m \frac{\sqrt{6}}{2} w_r} \tag{10}$$

A partir de las Ecuaciones de la máquina síncrona juntamente con el condensador referidas al eje síncrono, se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 5, en donde se observa un lazo interno perteneciente al lazo de corriente en el eje de cuadratura y dos lazos externos que corresponden al control de velocidad de la máquina y el control de la tensión del $V_{DC-link}$ [15].

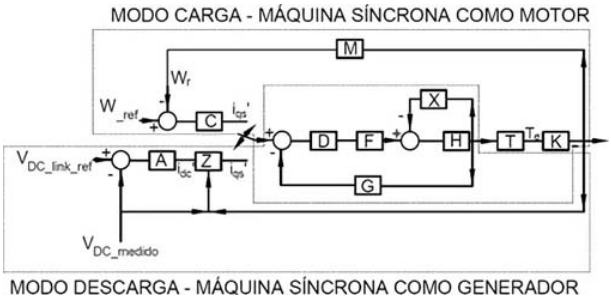


Figura 5. Lazo de control de la tensión del $V_{DC-link}$ y velocidad de la máquina síncrona

De la Figura 5, G y M son las ganancias asociadas a los censados de corriente y de velocidad con valores unitarios, D, A, C son las funciones de transferencia de los controladores. En esta aplicación se ha utilizado controladores PI; F es la ganancia del PWM, que en este caso se ha utilizado con ganancia unitaria. H viene expresada por la Ecuación (1), $Z = \frac{2V_{DC_medido}I_{dc}}{p\lambda_m\sqrt{6}w_r}$, $T = \frac{p\lambda_m\sqrt{6}}{2}$, $X = \left(\frac{p\lambda_m\sqrt{6}}{2}\right)^2\left(\frac{1}{Js'+B}\right)$, $K = \frac{1}{Js'+B}$.

Para la sintonización del lazo de velocidad y de corriente es necesario conocer los parámetros eléctricos y mecánicos de la máquina síncrona trifásica, estos datos están indicados en la Tabla 1 [15].

Tabla 1. Parámetros de la máquina síncrona de imanes permanentes

Potencia (kW)	< 125
Polos	2
Velocidad (krpm/min)	< 36
Resistencia del estator (Ω)	0,02
Inductancia del estator (μH)	entre 70 y 120
Inercia ($kg \cdot m^2$)	0,633
Coeficiente de fricción ($N \cdot m \cdot s$)	$4,2 \times 10^{-05}$
Inductancia externa (mH)	1,5

La función de transferencia necesaria para la sintonización del controlador PI relacionado al lazo de control de tensión del $V_{DC-link}$ es la misma que se expresa en las Ecuaciones (2) y (3).

Las Ecuaciones (11) y (12) son el resultado de la simplificación de los lazos de corriente y de velocidad de la máquina síncrona.

$$\frac{i_{qs}}{i'_{qs}} = \frac{Es'^2 + Ps' + N}{Qs'^3 + Is'^2 + Ys' + U} \tag{11}$$

Donde:

$E = 4JLV_{DC-link}$, $P = (4LBV_{DC-link} + 4JRV_{DC-link})$.
$N = 4RB, L = L_{máquina-síncrona} + L_{externa}$ pertenecientes al numerador de la Ecuación (11).
$Q = 4JL^2$, $I = 4L^2B + 8JRL$, $Y = 8RBL + 6V_{DC-link}p^2\lambda_m^2L$, $U = 4R^2B + 6V_{DC-link}p^2\lambda_m^2R$, $L = L_{máquina-síncrona} + L_{externa}$ pertenecientes al denominador de la Ecuación (11).

$$\frac{w_r}{i_{qs}} = \frac{1,22p\lambda_m}{Js' + B} \tag{12}$$

La sintonización de los PI para los diferentes lazos de control se realiza por asignación de polos y ceros, considerando los siguientes aspectos [11]:

La frecuencia de conmutación en este trabajo se ha fijado en 15 kHz, lo que limita las dinámicas de los lazos de corriente, dado que para frecuencias superiores a $\frac{f_{sw}}{2} = 7.5\ kHz$, la técnica del modelado pierde validez.

A parir de la frecuencia de sintonización del PI para el lazo de corriente, se debe sintonizar una década menos para los lazos restantes de control.

El margen de fase del diagrama de Bode tiene que ser mayor o igual a 60° eléctricos.

El margen de ganancia mayor o igual a 7 dB.

Considerando estos aspectos se obtuvieron los siguientes parámetros del PI:

Sistema de control 1: para el lazo de corrientes en el eje directo y cuadratura el controlador PI posee un $k_p = 0,36$ y $k_i = 0,09$, para el lazo de control de tensión del bus de continua $V_{DC-link}$ el controlador PI posee un $k_p = 51,02$ y $k_i = 0,32$ y para el lazo de control de tensión de la red de distribución el controlador PI posee un $k_p = 36,98$ y $k_i = 4,3$.

Sistema de control 2: para el lazo de corrientes en el eje directo y cuadratura el controlador PI posee un $k_p = 655$ y $k_i = 166,62$, el lazo de control de tensión del bus de continua $V_{DC-link}$ posee los mismos valores que del sistema de control 1 y para el lazo de control de la velocidad de la máquina síncrona el controlador PI posee un $k_p = 9,5$ y $k_i = 0,005$.

El sistema basado en el volante de inercia posee dos restricciones en *modo descarga*:

Nivel de tensión mínimo que puede tener el bus de continua $V_{DC-link}$, que se calcula mediante la Ecuación (13) [10].
Para este trabajo, la tensión mínima es de $V_{dc_minimo} = 639\ V$.

Profundidad de descarga de los volantes de inercia.
El cual se calcula como el 75 % de su energía almacenada, que para este caso es de $w_{r-minimo} = 27 rad/s$.

$$V_{DC_mínimo} = \frac{2\sqrt{2}V_{f-n(rms)}}{D_q} \tag{13}$$

Si el sistema basado en volantes de inercia se encuentra por debajo de las restricciones en *modo descarga*, la referencia de corriente se fijará a un valor 0, para que de este modo no inyecte ni absorba energía durante la presencia de un hueco de tensión en el PCC.

3. Resultados y discusión

3.1. Desempeño de sistema de control

Para comprobar el desempeño del sistema basado en volante de inercia se considera los límites establecidos en la sección 2, a partir de ello se procede a simular el modelo de la Figura 1, sin incluir el sistema basado en volante de inercia. El resultado del nivel de tensión está indicado en la Figura 6.

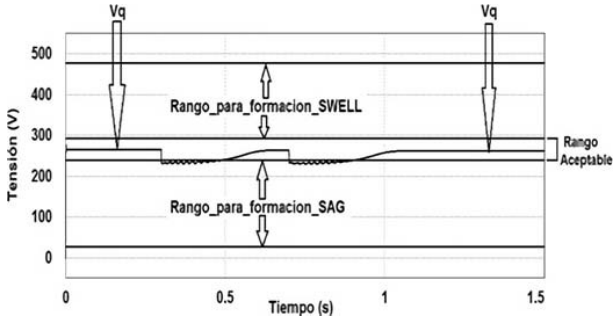


Figura 6. Comportamiento de tensión en el PCC al momento del arranque de los motores en la red de distribución sin el sistema de energía basado en volantes de inercia

Al observar la Figura 6, antes de ingresar en funcionamiento las cargas (t < 0,3 s), el nivel de tensión en el PCC es de 265,5 V encontrándose dentro de los márgenes aceptables establecidos en la sección 2 y con una corriente de 13 A (Figura 7) debido a la carga de 20 Ω que se encuentra conectada.

Al momento de ingresar a funcionar el primer motor eléctrico (t ≥ 0,3 s) se observa una disminución repentina y transitoria de la tensión, con un valor igual a 231 V (Figura 6), el cual demanda un pico de corriente de 400 A con un tiempo de duración de 0.2 s indicado en la Figura 7. En esta condición, la tensión existente en el PCC se ubica dentro del rango establecido para la formación de un hueco de tensión (*sags*).

El tiempo en que ingresa nuevamente el nivel de tensión dentro del rango aceptable es de 0,2 s (Figura 6).

Tal comportamiento en 0,7 s, debido a que se conecta el segundo motor, con el mismo valor de pico de corriente y tiempo de estabilización.

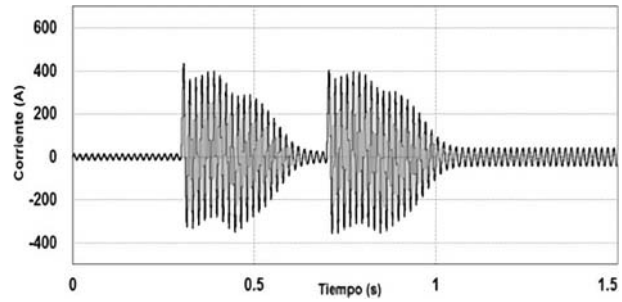


Figura 7. Comportamiento de corriente en la fase «A» En PCC al momento del arranque de la máquina eléctrica en la red de distribución sin el sistema de energía basado en volantes de inercia

Ahora se considera la conexión del sistema de energía basado en volantes de inercia, que inyecta energía para mitigar los huecos de tensión en el PCC obteniendo la Figura 8.

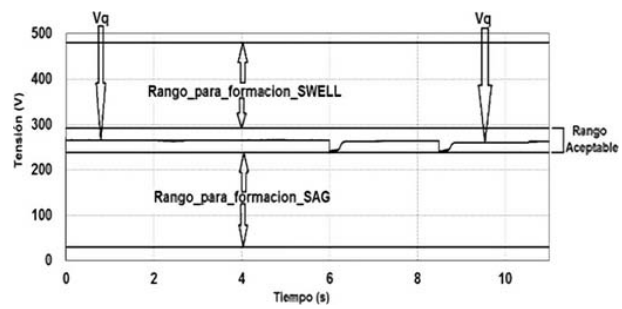


Figura 8. Nivel de tensión con la inclusión del sistema de energía basado en volantes de inercia para mitigar los huecos de tensión en el PCC

En la Figura 8 se puede observar que al momento del arranque del primer motor que ocurre en el tiempo de 6 s, el nivel de tensión se encuentra dentro del rango aceptable establecido en la sección 2, con un valor de 244 V, en comparación con el nivel de tensión de la Figura 6 se incrementó 13 V. De igual modo sucede en 8,5 s cuando ingresa a funcionar el segundo motor con nivel de tensión al momento del arranque de 244 V.

En la Figura 9 se puede apreciar el nivel de tensión del $V_{DC-link}$ y la velocidad de la máquina síncrona. Se observan los siguientes sucesos: antes de ingresar a funcionar los motores el nivel de tensión del $V_{DC-link}$ se incrementa hasta un valor de referencia de 900 V, con el convertidor de potencia asociado funcionando como rectificador para que de esta manera pueda absorber energía desde la red de distribución, con su respectivo lazo de corriente con referencia negativa igual a –20 A (Figura 10a). Cabe destacar que en esta condición, la corriente del sistema basado en volante de inercia denominada I_{filtro} está desfasada de la corriente que circula a la carga (Figura 10a). De igual manera, en la Figura 9 se observa que la velocidad de la máquina síncrona empieza a incrementarse hasta un valor de referencia de 200 rad/s con el convertidor de potencia

asociado funcionando como inversor, de esta manera, el volante de inercia absorbe energía desde la fuente de tensión del $V_{DC-link}$, con su respectivo lazo de corriente con referencia positiva igual a 40 A (Figura 11). En este estado el sistema de energía basado en volante de inercia se encuentra en modo de carga.

Cuando la máquina síncrona funcionando como motor alcanza la velocidad de referencia respectiva consume una corriente total de 3,8 A (Figura 11). En este estado el sistema de energía basado en volante de inercia se encuentra en modo *stand-by*.

En el tiempo t $\geq$ 6 s de la Figura 9 se observa una repentina disminución de la tensión del $V_{DC-link}$ con un valor igual a 860 V, esto se debe a que ingresó a funcionar el primer motor conectado al PCC, en este instante el convertidor de potencia asociado funciona como inversor para inyectar energía hacia la red de distribución, con su lazo de corriente con referencia positiva igual a 115 A (Figura 10b). Un aspecto importante es que la corriente del sistema basado en volante de inercia denominado I_{Filtro} inyectada hacia la red de distribución se encuentra en fase con la corriente que circula hacia la carga (Figura 10b).

Para que la tensión del $V_{DC-link}$ no disminuya bruscamente, la máquina síncrona empieza a funcionar como generador disminuyendo su velocidad hasta un valor de 164,3 rad/s entregando energía mediante el convertidor de potencia en modo rectificador hacia la fuente de tensión del $V_{DC-link}$, con su respectivo lazo de corriente con referencia negativa igual a –100 A (Figura 11).

La disminución de tensión del $V_{DC-link}$ y la velocidad de la máquina se mantienen durante el arranque del motor que es de 0,2 s. En este estado, el sistema basado en volante de inercia se encuentra en modo descarga.

Una vez transcurrido el tiempo de arranque del motor y cuando la tensión del PCC se encuentre dentro del rango establecido en la sección 3, la tensión del $V_{DC-link}$ juntamente con la velocidad de la máquina se vuelven a incrementar hasta su valor de referencia (Figura 9), repitiéndose nuevamente el ciclo mencionado anteriormente cuando exista la presencia de otro hueco de tensión.

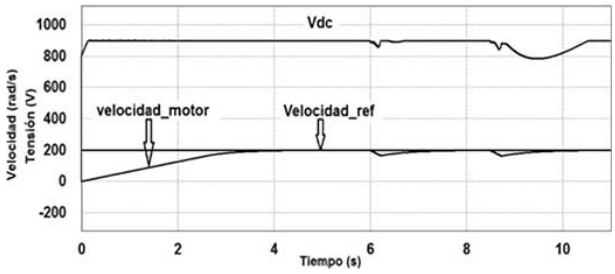


Figura 9. Nivel de tensión del $V_{DC-link}$ y velocidad de la máquina síncrona

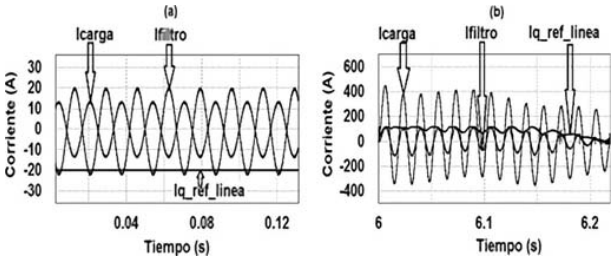


Figura 10. Corriente de referencia del sistema de energía basado en volantes de inercia: a) modo carga, b) modo descarga

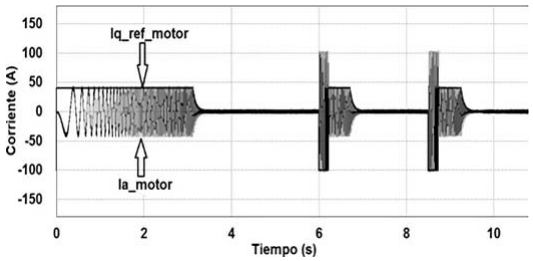


Figura 11. Corriente de referencia para la máquina síncrona

Otro aspecto importante es el nivel de THD que se produce al momento de carga, *stand-by* y descarga del sistema basado en volante de inercia. Tras el ensayo de simulación, se obtuvieron los siguientes resultados: 1) con respecto al THD de la corriente que circula hacia la carga se obtuvo 2.4 % menor a lo establecido que es del 8 % (regulación CONELEC 004/01, NP EN 50160-2010), 2) con respecto al THD de la tensión medido en el PCC se obtuvo 2.4 % menor a lo establecido, 3) con respecto al THD de la corriente que circula hacia el sistema basado en volante de inercia se obtuvo 3.4 % menor a lo establecido en la normativa.

4. Conclusiones

El presente artículo realiza un estudio acerca de los niveles de tensión que se originan con la introducción del sistema de energía basado en volantes de inercia en una red de distribución, ante la presencia de huecos de tensión originados por el ingreso de cargas transitorias a la red eléctrica. De acuerdo con los resultados expuestos se puede concluir que, al momento de cargarse el sistema con la presencia de cargas en la red eléctrica, es regulado el nivel tensión en la red de distribución.

El sistema posee un tiempo de respuesta menor a los milisegundos, por lo tanto, evita la formación de huecos de tensión en el PCC al momento del arranque de cargas importantes conectadas a la red.

Otro aspecto importante es que el sistema de energía basado en volante de inercia no afecta los niveles de THD de la tensión y corriente en el PCC.

Una limitación que presenta este sistema es que una vez llegado a su carga nominal no puede actuar

ante una sobretensión (*swell*), pues ya no va a tener la capacidad de absorber la energía excedente en el PCC, debido a que el nivel de tensión del bus de continua como la velocidad de la máquina síncrona alcanzaron sus valores nominales. De no tomar previsiones, provocaría un deterioro en la vida útil de cada uno de los componentes del sistema, acortando su operatividad en el tiempo.

Un problema que posee este sistema, es que, si el nivel de tensión del bus de continua y la velocidad de la máquina síncrona se ubican por debajo de los valores mínimos permitidos, el sistema ya no va a poder inyectar energía para evitar la formación de los huecos de tensión y si el sistema de control en ese instante actúa de forma errónea, el sistema basado en volante de inercia va a empezar a absorber energía desde la red para ingresar al modo carga involucrando de forma directa una disminución más drástica del nivel de tensión en el PCC. Para solucionar este inconveniente se debe instalar en paralelo otro sistema de inyección de energía auxiliar, el cual debe constar de un sistema de control que monitoree conjuntamente: el nivel de tensión del bus de continua, la velocidad de la máquina síncrona y la tensión de la red de distribución, pues de este modo cuando el sistema basado en volante de inercia y la red de distribución se ubiquen por debajo de los valores permitidos empiece a inyectar energía para evitar lo formación de los huecos de tensión en el PCC.

Agradecimientos

El primer autor agradece a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt) de la República del Ecuador por la beca de cuarto nivel.

Referencias

[1] N. S. Gayathri, N. Senroy, and I. N. Kar, "Smoothing of wind power using flywheel energy storage system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 3, pp. 289–298, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0076

[2] D. O. Akinyele and R. K. Rayudu, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, pp. 74–91, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004

[3] S. Gayathri Nair and N. Senroy, "Power smoothening using multi terminal dc based dfig connection and flywheel energy storage system," in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584134

[4] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. A. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes," *Información tecnológica*, vol. 25, pp. 175–188, 00 2014. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020

[5] D. R. Aitchison, M. Cirrincione, and N. Leijtens, "Design development of a flywheel energy storage system for isolated pacific island communities," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2016, pp. 1628–1633. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7577003

[6] J. Itoh, T. Masuda, D. Sato, T. Nagano, T. Suzuki, and N. Yamada, "Development of magnetic assist system in flywheel energy storage system for power load-leveling," in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 198–203. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884537

[7] X. Zhang and J. Yang, "A robust flywheel energy storage system discharge strategy for wide speed range operation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 7862–7873, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2694348

[8] F. Franco Hernández and H. Valdés Carrillo, *Minería artesanal del oro de aluvión en Mocoa, Putumayo, Amazonia colombiana.* Universidad Nacional de Colombia, 2005. [Online]. Available: https://bit.ly/2zTe5uL

[9] G. V. Deshpande and S. S. Sankeshwari, "Speed control of induction motors using hybrid pi plus fuzzy controller," *International Journal of Advances in Engineering & Technology, IJAET*, vol. 6, no. 5, pp. 2253–2261, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3dYCspA

[10] L. G. González Morales, "Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable," Ph.D. dissertation, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/2Tqfksm

[11] F. A. Bardemaker, "Modulação vetorial aplicada a retificadores trifásicos PWM unidirecionais," Ph.D. dissertation, 2006. [Online]. Available: https://bit.ly/3e5gsta

[12] A. S. de Morais, F. Lessa Tofoli, and I. Barbi, "Modeling, digital control, and implementation of a three-phase four-wire power converter used as a power redistribution device," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 3, pp. 1035–1042, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TII.2016.2544248

[13] S. M. de Pancorbo, G. Ugalde, J. Poza, and A. Egea, "Comparative study between induction motor and synchronous reluctance motor for electrical railway traction applications," in *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2015, pp. 1–5. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/EDPC.2015.7323219

[14] M. Bhardwaj, *Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors*. Texas Instruments, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3gahvKc

[15] S. Talebi Rafsanjan, "Advanced high-speed flywheel energy storage systems for pulsed power application." Ph.D. dissertation, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/3cPPO7j

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.06
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Detección de la muerte súbita cardíaca usando el método espectral adaptativo sobre la onda T: Estudio experimental sobre bases de datos públicas

Detection of sudden cardiac death using the adaptive spectral method on the T wave: An experimental study on public databases

Marco Flores-Calero[1,*,2], Melisa Pilla-Barroso[3]

Resumen

El análisis de la alternancia de la onda T (TWA, T-wave alternants) constituye una de las principales técnicas para determinar la presencia del síndrome de muerte súbita cardíaca (MSC). Entre los métodos existentes para determinar TWA se encuentra el método espectral adaptativo (SM-Adaptativo), el cual utiliza distribuciones en tiempo-frecuencia (TFD, time-frecuency distribution) para el análisis. El objetivo del estudio es aplicar este método sobre las principales bases de datos públicas con el fin de detectar la presencia o ausencia de alternancias y obtener parámetros de calidad del método en mención. El método fue probado en señales sintéticas, 90 señales sin TWA y 450 con TWA; por otro lado, se utilizaron 10 señales de la base de datos TWADB de Physionet pertenecientes a pacientes sanos y 26 señales de pacientes con factores de riesgo asociados a la MSC. En las pruebas con señales sintéticas se obtuvo una sensibilidad de 94,89 %, especificidad de 92,22 % y exactitud de 94,44 %. En cuanto a las pruebas en la base de datos el método presenta una exactitud del 80,56 %, lo que indica que el método SM-Adaptativo permite detectar TWA con una exactitud aceptable, además, que presenta mayor robustez frente a ruido y a la estacionariedad de datos.

Palabras clave: ECG, muerte súbita cardíaca, alternancia de la onda T, SM-Adaptativo

Abstract

T-wave alternans (TWA) analysis is one of the main techniques for determining whether an individual is at risk of sudden cardiac death (SCD). Among the existing methods for determining TWA is the adaptive spectral method (SM-Adaptive), which uses time-frequency distributions (TFD) for the analysis. The objective of the study is to apply the method on main public databases in order to detect the presence or absence of alternations, and to obtain quality parameters of the aforementioned method. The method was tested on synthetic signals, 90 signals without TWA and 450 with TWA; on the other hand, 10 signals from Physionet's TWADB database belonging to healthy patients and 26 signals from patients with risk factors associated to SCD were used. Tests with synthetic signals showed a sensitivity of 94.89%, specificity of 92.22% and accuracy of 94.44%. As for the tests in the database, the method exhibits an accuracy of 80.56%, which indicates that the SM-Adaptive method enables detecting TWA with an acceptable accuracy and, in addition, it shows greater robustness against noise and stationary data.

Keywords: ECG, sudden cardiac death, T-wave alternans, SM-Adaptive.

[1,*]Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: mjflores@espe.edu.ec. http://orcid.org/0000-0001-7507-3325
[2]Departamento de Sistemas Inteligentes, Tecnología I&H, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.
[3]Profesional en libre ejercicio, Quito, Ecuador. http://orcid.org/0000-0002-1441-1236

Recibido: 06-02-2020, aprobado tras revisión: 21-05-2020

Forma sugerida de citación: Flores-Calero, M. y Pilla-Barroso, M. (2020). «Detección de la muerte súbita cardíaca usando el método espectral adaptativo sobre la onda T: Estudio experimental sobre bases de datos públicas». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 59-67. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.06.

1. Introducción

La muerte súbita cardíaca (MSC) es un evento que provoca de manera rápida e inesperada la muerte de un individuo aparentemente sano, o con una enfermedad cardíaca conocida, pero con poca probabilidad de muerte. La MSC se produce debido a una inestabilidad eléctrica del corazón, lo que impide que se produzca un latido cardíaco y como consecuencia el corazón deja de bombear sangre al resto del cuerpo. En el cerebro se presenta una falta de flujo sanguíneo, lo que provoca la pérdida de oxígeno; esto hace que pierda el conocimiento, de forma abrupta, y se produzca la muerte del individuo.

Entre las principales causas de la MSC están las de origen cardiovascular [1]. Las enfermedades cardíacas que se encuentran más asociadas con la MSC son las siguientes: enfermedad de la arteria coronaria, cardiomiopatías, anomalías electrofisiológicas, cardiopatía valvular y anomalías cardíacas congénitas, entre otras [2].

Asimismo, se estima que la MSC es la responsable de 3 a 7 millones de muertes cada año a nivel mundial [2], [3]. En los países latinoamericanos no se tienen registros oficiales relacionados con la MSC, lo que impide que se pueda conocer de manera precisa su incidencia. Los informes sobre este problema no resultan uniformes, debido a que la MSC supone un problema multifactorial y varía de acuerdo con la edad. Además, existe la posibilidad de que continúe incrementando como consecuencia del aumento de la enfermedad coronaria (tabaquismo, obesidad, diabetes mellitus, hipertensión arterial, aumento del colesterol), convirtiéndole en un importante desafío por resolver.

En la actualidad las terapias más utilizadas para la prevención de la MSC son la medicación y el desfibrilador cardioversor implantable (DCI) [3], sin embargo, al ser pruebas invasivas y de alto costo resulta evidente la búsqueda de técnicas que permitan una rápida detección de este tipo de fenómenos de gran interés en el ámbito social y tecnológico.

El ECG es una de las herramientas más utilizada para el estudio y diagnóstico de enfermedades cardíacas. Permite registrar la actividad eléctrica del corazón al colocar electrodos en la superficie del cuerpo, de modo que se obtiene una secuencia de latidos cardíacos descritos en un conjunto de ondas (P, Q, R, S, T), segmentos y complejos [4, 5].

Entre los mecanismos existentes para medir la inestabilidad eléctrica del corazón en el ECG se encuentran la prolongación del QT, dispersión del QT, potenciales tardíos, alternancia de onda T (TWA) y turbulencia de la frecuencia cardíaca [6]. La TWA ha sido utilizada para el análisis de la repolarización ventricular, que se manifiesta en el ECG como fluctuaciones periódicas de la amplitud de la onda T [7].

La estimación de TWA implica la medición latido a latido, de la variabilidad de la amplitud, duración y forma del segmento ST-T del registro ECG [8]. La señal TWA se encuentra generalmente en el rango de los microvoltios; por lo que, se hace necesario el uso de técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales y algoritmos computacionales para su detección.

En los últimos años, se han propuesto varios procedimientos de análisis de TWA. Las técnicas mayormente utilizadas han sido desarrolladas en el dominio temporal, entre ellas está el método de la media móvil (MMA), el cual calcula el valor de TWA utilizando la diferencia del valor medio de los latidos pares e impares [9]; otro método es el de correlación (CM), que detecta alternancias utilizando la correlación cruzada [10]. Entre los métodos desarrollados en el dominio de la frecuencia se encuentran el método espectral (SM), el cual emplea la transformada discreta de Fourier (DFT) para analizar la componente de frecuencia a 0,5 ciclos por latido [11]. Un método similar es el de la demodulación compleja (CD), el cual ajusta una señal sinusoidal a la frecuencia de 0,5 ciclos por latido de las ondas T alineadas [12]. La principal desventaja de estos métodos es que son muy sensibles a las señales con ruido. Últimamente las técnicas de inteligencia artificial están siendo utilizadas para la clasificación de MSC [5].

Con el fin de superar las limitaciones de los métodos antes descritos Ghoraani *et al.* [13] proponen un método de detección y cuantificación de TWA llamado SM-Adaptativo, el cual toma como base el proceso del método SM y utilizando distribuciones de tiempo-frecuencia hace el análisis de TWA; de modo que permite representar las variaciones espectrales de TWA a lo largo del tiempo, a la vez que cuenta con la capacidad de seguir estructura no estacionarios. Por otro lado, utiliza la factorización de matrices no negativas (NMF) con el fin de separar el ruido de la señal TWA, y de este modo mejorar la capacidad de detección.

En este trabajo el principal objetivo es evaluar el desempeño del método SM-Adaptativo en distintos escenarios. Para lograr esto se han utilizado un conjunto de señales sintéticas (simulaciones) con y sin TWA agregado con amplitudes variables, y ante distintos niveles de ruido. El primer grupo, es decir, las señales sintéticas con TWA agregado se generaron a partir de cinco señales base a las cuales se les ha sumado alternancias con valores distintos de amplitud: 10 μV, 20 μV, 50 μV, 100 μV y 200 μV. De este modo se tienen 25 señales; las alternantes se generan a partir de tres formas de onda: gaussiana, triangular y rectangular, lo que da lugar a 75 señales. Finalmente, se agregaron cinco niveles diferentes de ruido blanco gaussiano a todas las señales ECG, SNR: 10, 20, 30, 40 y 50. Estas señales junto a las señales libres de ruido dieron un total de 450 señales de prueba. Para el segundo grupo, conformado por señales sintéticas con TWA, se tomaron cinco señales base, con tres formas

de onda distintas (15 señales), y cinco niveles de ruido. Obteniendo junto con las señales libres de ruido 90. De este modo entre los dos grupos se tienen un total 540 señales sintéticas de prueba. A continuación, se desarrolló la prueba en señales reales para lo cual se aplicó el método SM-Adaptativo a 36 señales de la base de datos TWADB de Physionet. Las señales pertenecen a pacientes sanos y a pacientes que presentan factores de riesgo de sufrir MSC. Se hizo el cálculo de la magnitud de TWA con el fin de determinar la existencia o por el contrario la ausencia de alternancias de la señal de prueba. Con lo que se pudo establecer los valores de sensibilidad, especificidad y exactitud. Además, se hizo una comparación de dichos parámetros con los métodos SM y MMA que se encuentran disponibles en el *software* TWAnalyser [14].

2. Materiales y métodos

El presente trabajo se centra en el análisis de señales cardíacas; 540 señales sintéticas y 36 señales de la base de datos TWADB, con el fin de detectar TWA en las señales utilizando el método SM-Adaptativo, y a continuación, obtener los parámetros de calidad del algoritmo, para evaluar el desempeño.

Inicialmente el método requiere de una etapa de preprocesamiento para filtrar las señales y para detectar y segmentar los puntos característicos de la señal ECG.

A continuación, se aplica el método SM-Adaptativo seguido de la técnica NMF (factorización de matrices no negativas) con el fin de detectar la presencia o ausencia de alternancias de la señal. Esto hace posible la clasificación de las señales con y sin TWA. La Figura 1 muestra las etapas de la metodología propuesta.

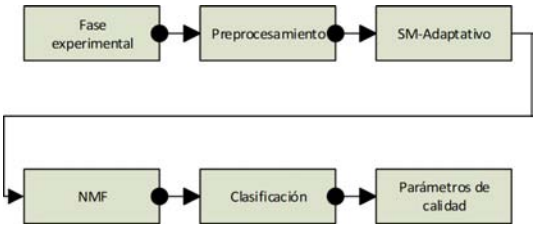


Figura 1. Metodología propuesta para la detección de MSC.

Con este procedimiento se pueden obtener los parámetros de calidad del método; sensibilidad, especificidad y exactitud.

2.1. Desarrollo de la fase experimental

En primer lugar, se probó el desempeño del algoritmo en señales sintéticas, 450 señales sintéticas que representan a señales sin TWA, con diferentes niveles de ruido y amplitud de la alternancia variable. Además, un segundo grupo de 90 señales sin TWA agregado, es decir, amplitud 0 μV y con diferentes valores de ruido.

Luego, se seleccionaron 36 señales tomadas de la base de datos T-Wave Alternans Database (TWADB) presentada en [15], la cual incluye señales pertenecientes a pacientes sanos y a pacientes que presentan factores de riesgo de MSC. Los registros ECG han sido muestreados a 500 Hz con una duración aproximada de dos minutos.

Las 36 señales se encuentran divididas de la siguiente forma, 10 señales corresponden a pacientes sanos, y las 26 señales restantes a pacientes con factores de riesgo de MSC, estos registros se han obtenido de pacientes con infartos de miocardio, isquemia transitoria, taquiarritmias ventriculares entre otros.

2.2. Preprocesamiento

Las señales cardíacas, generalmente, presentan ruido, que perturba y distorsiona la información contenida en la señal. El ruido es causado por interferencias externas, como el movimiento del cuerpo, la respiración y contracciones musculares, mala colocación de los electrodos, etc. Es por ello por lo que es necesario una etapa de preprocesamiento robusto, que incluya la eliminación del ruido, la extracción de interferencias en distintas frecuencias externas y la corrección de la desviación de la línea de base [4].

Los métodos utilizados deben garantizar que se realiza un filtrado adecuado, a la vez que, no se pierde información relevante, ya que las alternancias, al encontrarse a nivel de microvoltios suele confundirse con componentes de ruido. En este caso se persigue mantener las características alternantes, y a la vez, eliminar el ruido.

Por otro lado, como prerrequisito para el funcionamiento del método SM-Adaptativo es necesario extraer el segmento ST-T, de cada latido. Para lo cual, es necesario un método de extracción de características y uno de segmentación de las distintas ondas, segmentos y complejos que componen la señal ECG [5].

2.3. Descripción de SM-Adaptativo

El método SM-Adaptativo utiliza distribuciones en tiempo-frecuencia para obtener una representación de las componentes de frecuencia de la señal a lo largo del tiempo, se encuentra compuesto por dos etapas, i) alineación y ii) estimación del TFD adaptativo.

2.3.1. Alineación

Con las ondas alineadas se construye una matriz A, como se muestra en la Ecuación (1), de dimensiones M $\times$ N, donde M es el número de latidos, en este caso 128, y N es la longitud del segmento ST-T.

$$A = \begin{bmatrix} T_1(1) & T_1(2) & \cdots & T_1(N) \\ T_2(1) & T_2(2) & \cdots & T_2(N) \\ T_3(1) & T_3(2) & \cdots & T_3(N) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ T_M(1) & T_M(2) & \cdots & T_M(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_N \end{bmatrix} \tag{1}$$

Las filas representan los segmentos ST-T de cada latido y las columnas describen las variaciones latido a latido del segmento ST-T. La representación gráfica de la matriz de alineación A se muestra en la Figura 2.

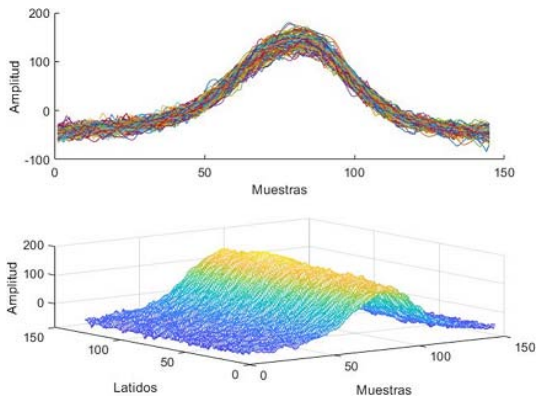


Figura 2. Segmentos ST-T alineados (128 segmentos) con una longitud de 132 muestras, de la señal TWADB55

2.3.2. TFD adaptativo.

TFD es una representación bidimensional de la energía de una señal en términos del tiempo y la frecuencia. El método TFD adaptativo utiliza el algoritmo Matching Pursuit para descomponer una señal x en átomos de tiempo-frecuencia. Una vez que la señal se descompone se utiliza la distribución de Wigner-Ville para obtener la distribución de energía en el dominio de tiempo-frecuencia, usando la Ecuación (2).

$$V(t,f) = \sum_{i=1}^{I} |\alpha_{\gamma i}|^2 \, WVG_{\gamma i}(t,f) \tag{2}$$

Aplicando el método TFD Adaptativo a la matriz A se genera la matriz Vi y calculando el promedio se construye una matriz definida por la Ecuación (3).

$$V_{\frac{M}{2}\times M} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V_i \tag{3}$$

La magnitud de TWA se calcula tomando los valores de energía a 0,5 ciclos por latido. Para estimar el valor de TWA se requiere la energía a 0,5 ciclos por latido T(t) y los valores de energía del ruido presente en el intervalo 0,36 a 0,49 ciclos por latido.

Las Figuras 3 y 4 muestran una representación gráfica del TFD adaptativo sobre dos señales cardíacas de la base de datos TWADB [15].

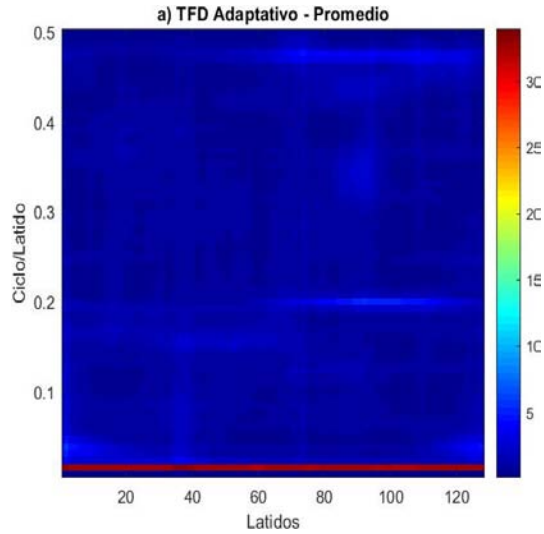


Figura 3. TFD adaptativo promedio de la señal TWADB55 correspondiente a una señal de un paciente sano; a 0,5 cpl se observa valores bajo de alternancia

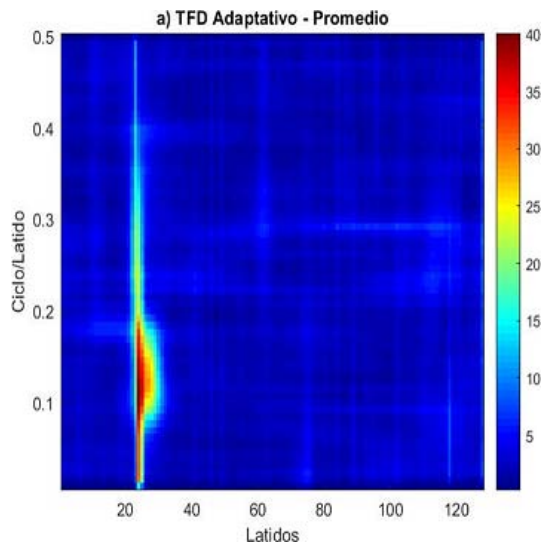


Figura 4. TFD adaptativo promedio de la señal TWADB12 correspondiente a una señal de un paciente con factores de riesgo de MSC; a 0.5 cpl se observa valores bajo de alternancia, sin embargo, entre las muestras 20 y 40 se tiene un posible componente alternante

2.4. Factorización de matrices no negativas

En esta etapa se construye una nueva matriz $V_{l\times M'}$, en este caso $I = 16$ y M es igual a la longitud de la ventana de análisis, en este caso 128. NMF factoriza la matriz de entrada V en dos matrices de menor tamaño $W_{m\times r}$ y $H_{r\times n}$. Tomando un valor de $r = 3$, se consiguen tres vectores, W_1, W_2 y W_3. Los componentes representativos de la magnitud de TWA se agrupan en un solo vector al que se lo representa como W_t.

La magnitud de TWA se expresa de acuerdo con la Ecuación (4) y, de este modo, se consigue separar los componentes alternantes de los componentes de ruido.

$$TWA = w_t h_t \tag{4}$$

Finalmente, se calcula el valor de TWA del vector w_t que es el componente con la mayor magnitud TWA, de acuerdo con la Ecuación (5).

$$f = Real\sqrt{T - \mu_{ruido}} \tag{5}$$

Las Figuras 5 y 6 muestran la separación de los componentes alternantes del ruido. La gráfica superior indica los componentes alternantes, en la parte inferior se muestra el ruido extraído de la señal.

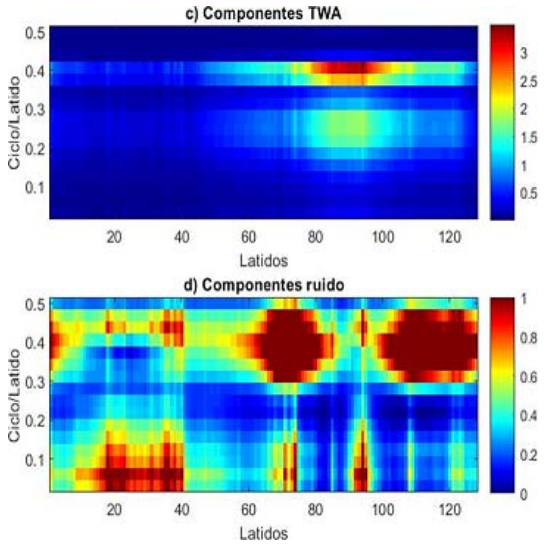


Figura 5. Descomposición de la señal TWADB55 en sus componentes alternantes y ruido

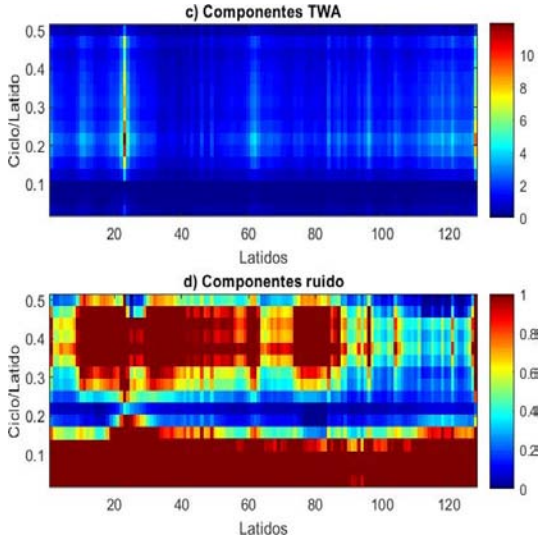


Figura 6. Descomposición de la señal TWADB12 en sus componentes alternantes y ruido

Las Figuras 7 y 8 corresponden a la señal factorizada en tres componentes; el componente con la mayor magnitud de TWA se indica en la gráfica.

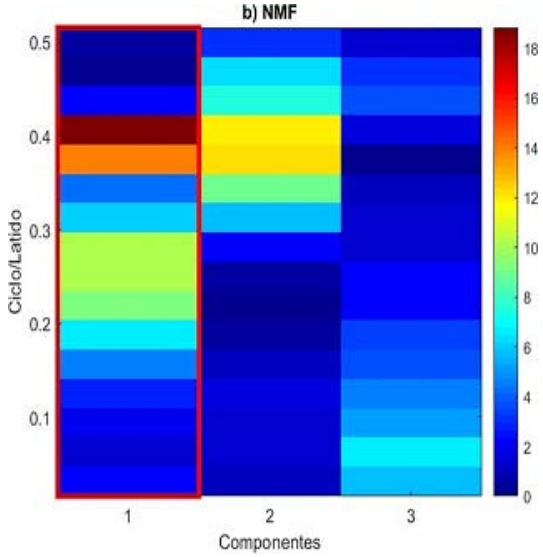


Figura 7. Componente con la mayor magnitud de TWA de la señal TWADB55, a 0,5 bcpl se hace el cálculo de TWA

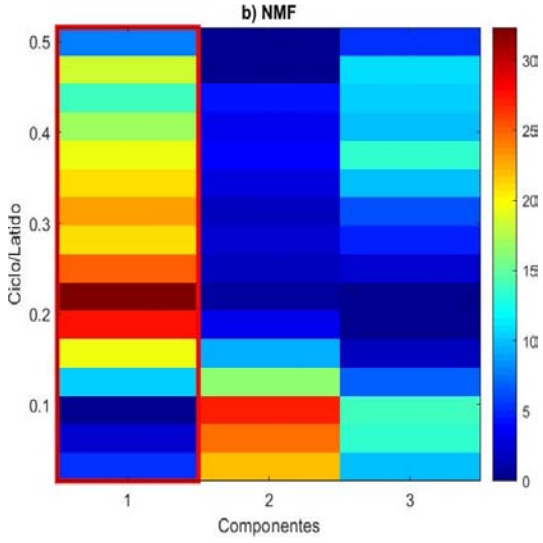


Figura 8. Componente con la mayor magnitud de TWA de la señal TWADB12, a 0.5 cpl se hace el cálculo de TWA

2.5. Clasificación

Inmediatamente, después de calcular la magnitud de TWA, se establece un valor de umbral (Th) de $1,5\ \mu V$. Entonces las señales se clasifican de acuerdo con la hipótesis dada por la Ecuación (6).

$$\begin{array}{l} f > Th \Rightarrow H_0 \\ f < Th \Rightarrow H_1 \end{array} \tag{6}$$

Donde H_0 indica presencia de TWA en la señal, e inversamente, H_1 indica la ausencia de TWA.

3. Resultados y discusión

3.1. Pruebas con señales sintéticas

Esta primera prueba fue realizada con el fin de evaluar el comportamiento del método SM-Adaptativo en señales sintéticas, que simulan señales cardíacas, a las que se les ha agregado alternancias artificiales y ruido, en distintos niveles.

El esquema de la Figura 9, muestra las señales sintéticas utilizadas, divididas en dos grupos, y el proceso necesario hasta conseguir los parámetros de calidad.

Figura 9. Proceso para la obtención de los parámetros de calidad utilizando señales sintéticas con y sin TWA agregado

Inicialmente, el método SM-Adaptativo fue evaluado en 90 señales sintéticas sin TWA, es decir, señales que simulan señales cardíacas sin presencia de alternancias, las mismas que corresponden a individuos sanos. Los resultados de la clasificación obtenida, al aplicar el método a las 90 señales se encuentra en la Tabla 1, los valores se presentan de acuerdo con los distintos niveles de ruido.

Tabla 1. Clasificación de las señales sintéticas sin TWA de acuerdo con los niveles de ruido agregado

SNR (dB)	VN	FP
Sin ruido	15 (100 %)	0 (0 %)
50	15 (100 %)	0 (0 %)
40	15 (100 %)	0 (0 %)
30	15 (100 %)	0 (0 %)
20	12 (80 %)	3 (20 %)
10	11 (73,33 %)	17 (26,67 %)
Total	**83 (92,22 %)**	**23 (7,78 %)**

Como resultado se tiene 83 verdaderos negativos (VN) y 7 falsos positivos (FP). Los verdaderos negativos indican, en este caso, que una señal sin TWA ha sido clasificada efectivamente como una señal sin TWA, por otro lado, los falsos positivos indican que una señal sin TWA ha sido clasificada como una señal que sí tiene TWA.

La Tabla 1 muestra que las señales sin presencia de ningún tipo de ruido, que no sucede en señales reales, han sido clasificadas correctamente. De igual forma sucede con las señales con valores altos de SNR, 50, 40 y 30 que se traducen en bajos niveles de ruido (amplitud del ruido), al ser inversamente proporcionales. La clasificación de las señales empieza a generar falsos resultados ante valores de SNR más bajos, para un SNR de 20 y 10 se observa que el número de falsos positivos es de 3 y 17 respectivamente, es decir, para este la clasificación no cuenta con un porcentaje de acierto de 100 % y en todo caso se ha reducido hasta 73,33 % en las señales con el valor más bajo de SNR. Esto indica que el algoritmo es sensible ante altos niveles de ruido (SNR bajo), particularmente a valores de SNR inferiores a 20.

Sin embargo, al calcular la especificidad del método que resulta ser de 92,22 %, el método SM-Adaptativo ha sido capaz de clasificar adecuadamente las señales sin TWA (individuos sanos) incluso ante altos niveles de ruido.

Continuando con las pruebas en señales sintéticas, se han tomado 450 señales sintéticas con TWA artificial agregado, señales que representan a individuos con factores de riesgo asociados a la MSC.

Los resultados de la clasificación se muestran en las Tablas 2 y 3. La Tabla 2 ha sido tabulada de modo que los resultados se dividen de acuerdo con el nivel de ruido, mientras que la Tabla 3 muestra los resultados de acuerdo con la amplitud de las alternancias agregadas.

Tabla 2. Clasificación de las señales sintéticas con TWA de acuerdo con los niveles de ruido agregado

SNR(dB)	VP	FN
Sin ruido	75 (100 %)	0 (0 %)
50	75 (100 %)	0 (0 %)
40	75 (100 %)	0 (0 %)
30	74 (98.66 %)	1 (1,34 %)
20	70 (93.33 %)	5 (6,67 %)
10	58 (77,33 %)	17 (22,67 %)
Total	**427 (94,89 %)**	**23 (7,78 %)**

Tabla 3. Clasificación de las señales sintéticas con TWA de acuerdo con la amplitud de las alternancias agregadas

Amplitud (μV)	VP	FN
10	76 (84,44 %)	14 (15,56 %)
20	85 (94,44 %)	5 (5,56 %)
50	87 (96,67 %)	3 (3,33 %)
100	89 (98,89 %)	1 (1,11 %)
200	90 (100 %)	0 (0 %)
Total	**427 (94,89%)**	**23 (5,11 %)**

Como resultado de la clasificación realizada por el método SM-Adaptativo, se tienen 427 pruebas diagnos-

ticadas como verdaderos positivos y 23 falsos negativos. Los verdaderos positivos indican que una señal con TWA ha sido clasificada como tal, por el contrario, los falsos negativos indican que una señal con TWA ha sido clasificada como una señal sin TWA.

En la Tabla 2 se encuentran las respuestas del método frente a señales con diferentes niveles de ruido. Una señal libre de ruido presenta un diagnóstico 100 % correcto, lo que sucede de manera similar con los valores SNR de 50 y 40, es decir, mientras mayor sea el valor del SNR contenido en la señal el método presenta resultados más precisos. Para los valores SNR de 30 dB, 20 dB y 10 dB, la clasificación empieza a presentar clasificaciones erróneas, tal es el caso que para estos valores de SNR se tienen 1, 5 y 17 falsos negativos, respectivamente. Por tanto, el método resulta más sensible a valores de SNR inferiores a 30 dB, dando paso falsas detecciones.

La Tabla 3 muestra la clasificación resultante frente a diferentes valores de alternancia, para una amplitud de 200 μV la detección se realiza con 100 % de exactitud, lo que indica que mientras mayor sea la alternancia contenida en la señal resulta más fácil para el algoritmo la detección de las alternancias. Mientras la amplitud de las alternancias va disminuyendo también lo hace el porcentaje de detección, que para 10 μV ha decrecido hasta 84,44 %, es decir, el método presenta dificultades en la detección cuando la amplitud de la onda alternante es muy pequeña, lo que podría deberse a que se está confundiendo con ruido u otro tipo de interferencia.

Conociendo los verdaderos positivos y falsos negativos de las pruebas, se calculó el valor de sensibilidad que es de 94,89 % un valor aceptable, lo que nos dice que el método cuenta con una alta probabilidad de clasificar correctamente una señal con TWA (individuos con riesgo de MSC). Por lo tanto, el método ha sido capaz de realizar una clasificación correcta con una precisión de 94,44 %, lo que indica que tiene una alta probabilidad de diagnosticar sin errores señales con y sin TWA, con diferentes niveles de ruido y alternancias variables.

3.2. Pruebas con señales de la base de datos TWADB

Una segunda forma de evaluación del desempeño de SM-Adaptativo se hizo utilizando señales reales de la base de datos TWADB de Physioet. Las señales seleccionadas corresponden tanto a individuos sanos como a individuos con riesgo de MSC como se muestra en el esquema de la Figura 10.

Las pruebas se realizaron en dos grupos de análisis, por un lado, se tomaron diez señales de pacientes sanos, es decir, señales que no contienen alternancias. Una vez aplicado el método SM-Adaptativo a estas señales, ha dado como resultado la clasificación que se muestra en la Tabla 4, donde se tiene la siguiente información: nombre de la señal escogida, el valor calculado de la alternancia detectada y el diagnóstico generado, verdadero negativo o falso positivo.

Figura 10. Proceso para la obtención de los parámetros de calidad utilizando señales de la base de datos TWADB

Tabla 4. Resultados generados por el método SM-Adaptativo en señales de individuos sanos

Señal	Valor TWA	Diagnóstico
twa39	0	VN
twa46	8,3949	FP
twa55	0	VN
twa60	0	VN
twa10	0	VN
twa23	0	VN
twa61	0	VN
twa62	0	VN
twa71	0	VN
twa93	27,1057	FP

El método clasificó a 8 de las 10 señales como señales sin TWA, es decir, se tienen 8 verdaderos negativos y 2 falsos positivos. Esto indica que el método es capaz de detectar correctamente una señal sin TWA y, por tanto, un individuo sano (especificidad), con un 80 % de probabilidad.

El otro grupo de análisis está conformado por 26 señales correspondientes a pacientes con riesgo de MSC. Los resultados se muestran en la Tabla 5, donde se tiene la siguiente información, nombre de las señales, valor calculado de TWA, en μV, y el diagnóstico de la detección.

En el caso de las señales con factores de riesgo de MSC, de las 26 señales, 5 fueron clasificadas como señales sin TWA, es decir, se tienen 5 falsos negativos; por otro lado, las 21 señales restantes han sido clasificadas correctamente y, por tanto, se tiene 21 verdaderos negativos. Con el número de verdaderos positivos y falsos negativos se ha calculado la sensibilidad del método, que es de 80,76 %, es decir, cuenta con una alta probabilidad para detectar correctamente señales sin TWA e individuos con riesgo de MSC.

De acuerdo con los datos de las Tablas 4 y 5, se tienen 29 señales clasificadas correctamente de un total

de 36 señales, entre señales con y sin TWA, lo que resulta en que el método cuente con una precisión de 80,56 %, es decir, el método tiene una alta probabilidad de detectar y clasificar correctamente las señales con y sin TWA.

Tabla 5. Resultados generados por el método SM-Adaptativo en señales de pacientes con factores de riesgo de MSC

Señal	Valor TWA	Diagnóstico
twa07	8,1842	VP
twa32	8,0292	VP
twa85	0	FN
twa92	3,6081	VP
twa00	0	FN
twa08	0	FN
twa45	40,2243	VP
twa63	1,8172	VP
twa68	4,1085	VP
twa95	6,5078	VP
twa12	0	FN
twa27	0	FN
twa03	24,1159	VP
twa11	9,8338	VP
twa18	6,7598	VP
twa19	6,1028	VP
twa20	0	FN
twa31	10,3374	VP
twa36	6,6947	VP
twa40	0	FN
twa41	5,6962	VP
twa48	8,1214	VP
twa49	4,0385	VP
twa53	2,6401	VP
twa54	53,9866	VP
twa83	9,1466	VP

Posteriormente, en este trabajo se hizo una comparación entre el método SM-Adaptativo y los métodos SM y MMA, estos últimos se encuentran implementados en el software TWAnalyser [14].

Para este experimento se tomaron 36 señales descritas anteriormente. Los resultados de especificidad, sensibilidad y precisión que se muestran en la Tabla 6.

El método MMA es el que presenta más problemas pues al tener una sensibilidad de 100 % y especificidad de 0 %, sugiere que clasifica a todas las señales como señales con TWA, aunque no contengan alternancias. Este método toma entonces, a cualquier tipo de perturbación en la señal como una alternancia, lo que es erróneo, es la razón de que el método clasifique equivocadamente al 50 % de las señales de prueba. Por otro lado, el método SM muestra un comportamiento más equilibrado, sin embargo, al compararlo con el método SM-Adaptativo el porcentaje de precisión en la clasificación es considerablemente inferior, apenas con una precisión de 63,89 %. SM-Adaptativo resulta como un método más aceptable con un comportamiento equilibrado en la detección de señales con y sin TWA.

Tabla 6. Parámetros de calidad de los métodos, SM-Adaptativo, SM y MMA

Parámetro	SM-Adaptativo	SM	MMA
Sensibilidad	80,76%	61,53%	100%
Especificidad	80%	70%	0%
Precisión	80,56%	63,89%	50%

Al observar los resultados, en los dos tipos de pruebas, es decir, sobre señales sintéticas y registros de la base de datos TWADB, estos indican un desempeño superior del método SM-Adaptativo, respecto a los otros dos métodos, en todos los índices de calidad. En específico, el algoritmo SM-Adaptativo se caracteriza por su robustez en la detección de las alternancias.

4. Conclusiones

Los extensivos experimentos mostraron que el método SM-Adaptativo es capaz de detectar alternancias y clasificar las señales correctamente. Adicionalmente se pudo comparar, mediante métricas estándar, el desempeño del algoritmo al ser sometido a diferentes niveles de ruido y niveles de alternancias, presentando ventajas frente a los clásicos SM y MMA. Esta superioridad se debe a que SM-Adaptativo utiliza distribuciones de tiempo-frecuencia que permiten un análisis más detallado de la señal, evitando la pérdida de información relevante contenida en la señal cardiaca y, por lo tanto, se tienen mejores resultados en la detección de alternancias.

En conclusión se puede indicar que SM-Adaptativo es una técnica prometedora para la detección, temprana y no invasiva de la MSC.

En un trabajo futuro se estudiará la capacidad del algoritmo en el análisis de larga duración y su desempeño en sistemas de monitorización móvil destinados a eHealth; todo esto acompañado con el criterio de un experto en cardiología especializado en MSC.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universdad de las Fuerzas Armadas por el financiamiento indirecto a través del proyecto de investigación «EcuSCD-Algoritmos avanzados de aprendizaje máquina para la detección de la muerte súbita cardíaca basado en el método espectral a partir de señales ECG».

Referencias

[1] M. Vargas Sanabria, J. C. Vega Chaves, G. Hernández Romero, and G. Montero Solano, "Síndrome de brugada como casusa de muerte súbita de origen cardíaco," *Medicina Legal de Costa Rica*, vol. 34, pp. 157–164, 03 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/2ZEI4Sf

[2] R. Devi, H. K. Tyagi, and D. Kumar, "Early stage prediction of sudden cardiac death," in *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2017, pp. 2005–2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2017.8300112

[3] J. T. Willerson, J. N. Cohn, H. J. J. Wellens, and D. R. Holmes, *Cardiovascular Medicine*, ser. SpringerLink : Bücher. Springer London, 2007. [Online]. Available: https://bit.ly/3eag8cD

[4] U. Satija, B. Ramkumar, and M. S. Manikandan, "Automated ecg noise detection and classification system for unsupervised healthcare monitoring," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 22, no. 3, pp. 722–732, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2686436

[5] F. Panjaitan, S. Nurmaini, M. Akbar, A. H. Mirza, H. Syaputra, T. B. Kurniawan, and R. Umi P, "Identification of classification method for sudden cardiac death: A review," in *2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, 2019, pp. 93–97. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICECOS47637.2019.8984465

[6] E. V. Garcia, C. A. Pastore, N. Samesima, and H. G. Pereira Filho, "T-wave alternans: desempenho clínico, limitações, metodologias de análise," *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, vol. 96, pp. e53–e61, 03 2011. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1590/S0066-782X2011005000018

[7] Y. Karplyuk, K. Ivanko, and N. Ivanushkina, "Peculiarities of t wave alternans detection and evaluation," in *2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2015, pp. 356–361. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146909

[8] O. Karnaukh, Y. Karplyuk, and N. Nikitiuk, "Evaluation of machine learning techniques for ecg t-wave alternans," in *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2018, pp. 346–350. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477528

[9] G. M. Nijm, S. Swiryn, A. C. Larson, and A. V. Sahakian, "Estimation of t-wave alternans from multi-lead ecg signals using a modified moving average method," in *2008 Computers in Cardiology*, 2008, pp. 517–520. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CIC.2008.4749092

[10] S. Ayub, G. Gupta, and Y. Kumar, "Heart rate calculation and detection of t-wave alternans by correlation method," in *2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 2016, pp. 200–203. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CICN.2016.45

[11] T. W. Shen and Y. T. Tsao, "An improved spectral method of detecting and quantifying t-wave alternans for scd risk evaluation," in *2008 Computers in Cardiology*, 2008, pp. 609–612. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CIC.2008.4749115

[12] B. D. Nearing, A. H. Huang, and R. L. Verrier, "Dynamic tracking of cardiac vulnerability by complex demodulation of the t wave," *Science*, vol. 252, no. 5004, pp. 437–440, 1991. [Online]. Available: http://doi.org/10.1126/science.2017682

[13] B. Ghoraani, S. Krishnan, R. J. Selvaraj, and V. S. Chauhan, "T wave alternans evaluation using adaptive time–frequency signal analysis and non-negative matrix factorization," *Medical Engineering & Physics*, vol. 33, no. 6, pp. 700–711, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.01.007

[14] A. Khaustov, S. Nemati, and G. D. Clifford, "TWAnalyser - AT-wave alternans detector," *Computers in Cardiology*, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/36nUz5L

[15] G. B. Moody, "The physionet/computers in cardiology challenge 2008: T-wave alternans," in *2008 Computers in Cardiology*, 2008, pp. 505–508. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CIC.2008.4749089

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.07
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Control para el voltaje de salida de un inversor multinivel de capacitores flotantes

Control for the output voltage on a flying capacitor multilevel inverter

Beatriz Angélica Aguilar-López[1], José Antonio Juárez-Abad[2,*], Jorge Luis Barahona-Avalos[2], Rosalino Mayoral-Lagunes[1], Jesús Linares-Flores[2], Marco Antonio Contreras-Ordaz[2]

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un controlador mediante la técnica de rechazo activo de perturbaciones para el seguimiento de la trayectoria de referencia para el voltaje de salida de un inversor multinivel de capacitores flotantes. Si en el modelo dinámico del convertidor se consideran las dinámicas de cada capacitor flotante y adicionalmente, las de los elementos pasivos del filtro de salida, el modelo resultante es de un orden alto, lo que dificulta su control. En este trabajo se emplea la modulación PS-PWM para mantener los voltajes en los capacitores flotantes en sus valores nominales y de esta manera poder generar un modelo dinámico simple, que resulta ser más fácil de controlar. Los resultados de simulación y experimentales, confirman que el controlador es robusto a perturbaciones provocadas por cambios en la carga, sin importar si son de tipo lineal o no lineal. Se realizó la construcción del prototipo experimental del sistema y se implementó el controlador y modulador en un FPGA y en la parte final se muestran los resultados obtenidos.

Palabras clave: balanceo natural, capacitores flotantes, control robusto, convertidor de potencia, linealización exacta, rechazo activo de perturbaciones

Abstract

This paper presents the design of a robust Active Disturbance Rejection Controller (ADRC) for tracking the reference trajectory of the output voltage of a flying capacitor multilevel inverter. If the dynamics of each flying capacitor and of the passive elements of the filter are considered in the dynamic model of the converter, it results a high order model, which is difficult to control. PS-PWM modulation is used in this work to keep the voltages in the flying capacitors at their nominal values, and thereby generate a second-order simple dynamic model that is easier to control. The simulation and experimental results confirm that the controller is robust in the presence of disturbances, caused by either linear or nonlinear load changes. The experimental prototype of the complete system was built, and the implementation of the controller and the modulator was carried out in a FPGA; the results obtained are shown in the final part.

Keywords: Active Disturbance Rejection, Exact Linearization, Flying Capacitors, Natural balancing, Power converter, Robust Control.

[1,*]División de Estudios de posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca – México.
http://orcid.org/0000-0002-2769-4992, http://orcid.org/0000-0003-3420-7416
[2]Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca - México.
Autor para correspondencia ✉: abad@mixteco.utm.mx
http://orcid.org/0000-0001-7440-0849, http://orcid.org/0000-0002-5502-6692
http://orcid.org/0000-0002-5723-4786, http://orcid.org/0000-0002-3478-796X

Recibido: 22-11-2019, aprobado tras revisión: 03-06-2020

Forma sugerida de citación: Aguilar-López, B. A.; Juárez-Abad, J. A.; Barahona-Avalos, J. L.; Mayoral-Lagunes, R.; Linares-Flores, J. y Contreras-Ordaz, M. A. (2020). «Control para el voltaje de salida de un inversor multinivel de capacitores flotantes». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 68-80. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.07.

1. Introducción

La energía eléctrica puede presentarse en dos modalidades: de corriente directa (CD) o de corriente alterna (CA). Existen aplicaciones donde se requiere la transformación de una forma de energía a otra, dicha conversión es llevada a cabo por un dispositivo conocido como convertidor de potencia; por ejemplo, la transformación CA-CD la realiza un convertidor llamado rectificador y para el caso de la conversión CD-CA la realiza un convertidor llamado inversor [1]. Los convertidores de potencia se construyen con dispositivos de conmutación y con elementos pasivos tales como capacitores, inductores, diodos y transformadores. Generalmente, la potencia, que es capaz de entregar un convertidor, está limitada por la capacidad de corriente y voltaje de sus interruptores o dispositivos de conmutación.

Aún cuando idealmente un inversor debería producir una tensión sinusoidal en las aplicaciones tradicionales de corriente alterna (para lograr mejor eficiencia y baja interferencia electromagnética, entre otras ventajas [2]), estos solo son capaces de producir ondas rectangulares (es decir, tres niveles). Con el surgimiento de las topologías de inversores multinivel, fue posible generar formas de onda de voltaje con múltiples niveles, las cuales se asemejan más a la forma de onda sinusoidal ideal. Las topologías más conocidas de convertidores multinivel son: celdas en cascada, diodos de enclavamiento y capacitores flotantes [3]. La primera topología mencionada se compone de la conexión en serie de puentes H y requiere fuentes de voltaje aisladas para cada una de las celdas, mientras que las dos últimas, ocupan solo una fuente de voltaje [4].

La topología de convertidores multinivel de capacitores flotantes (CMCF) ha demostrado ser una excelente elección en aplicaciones donde se requiere alta densidad de potencia [5]. La estructura de un CMCF está conformada por celdas de potencia. Cada celda de potencia se compone por un par de interruptores y un capacitor flotante. El número de niveles en la salida del CMCF puede incrementarse añadiendo más celdas al CMCF, sin embargo, se requieren más capacitores e interruptores. Cada capacitor flotante debe ser cargado a un voltaje nominal de cierto nivel. Dependiendo del estado de los interruptores de la celda, el capacitor flotante, aportará o no, su voltaje a la salida del convertidor.

Para la operación correcta del CMCF se debe mantener una distribución balanceada en los voltajes de los capacitores flotantes: cada uno de ellos debe conservar un voltaje nominal equivalente a una fracción del voltaje total del bus de CD dividido entre el número de celdas. Para lograr la operación correcta del CMCF se realizan dos procesos independientes conocidos como precarga y balanceo (o regulación) de los voltajes en los capacitores flotantes.

Para el caso de la precarga, algunos métodos reportados pueden ser consultados en [6] y [7]. Por otra parte, el balanceo de los voltajes en los capacitores flotantes puede realizarse de manera pasiva y activa. El balanceo natural o pasivo utiliza una técnica de modulación, comúnmente llamada como PS-PWM (por sus siglas en inglés, Phase Shifted-PWM). Esta técnica de modulación se emplea para generar los estados de conmutación que forman la señal de voltaje deseado en la salida y al mismo tiempo, mantiene en los capacitores flotantes una carga neta promedio igual a cero.

La técnica de balanceo pasivo, mencionada es sencilla de implementar, sin embargo no garantiza que los voltajes de los capacitores se establezcan en sus valores nominales, ya que regularmente los componentes utilizados en la construcción del CMCF poseen condiciones no ideales, es decir: corrientes de fuga desiguales en los capacitores, carga o descarga asimétrica en los capacitores y perturbaciones de carga, por mencionar algunos [8]. Por otro lado, en el balanceo activo, el voltaje de los capacitores flotantes es regulado individualmente. Este enfoque requiere el uso de un sensor de voltaje para cada uno de los capacitores flotantes como se muestra en [9] y [10] o bien, su estimación mediante observadores como se trata en [11].

Una tarea de control necesaria en los convertidores de potencia es proporcionar una salida de voltaje sin cambio en la amplitud, sin importar la resistencia efectiva de la carga. Para el caso del convertidor CD-CA se desea que la salida siga una referencia de voltaje a pesar de las perturbaciones generadas cuando la corriente de carga o del voltaje de entrada cambian [12]. Para que estas tareas sean llevadas a cabo de manera precisa, se requiere un sistema de control con retroalimentación. El seguimiento de voltaje en inversores multinivel ha sido abordado mediante diversas técnicas de control. Para la topología de celdas en cascada, han sido empleados diversos esquemas de control, tales como: controlador basado en pasividad [13] y el control integral proporcional generalizado lineal [14]. Para la topología de capacitores flotantes, el seguimiento de voltaje se ha realizado en [15] y [16]. En [15] se genera cada estado de conmutación apropiado para generar el voltaje de salida deseado, mediante un algoritmo que no requiere una modulación adicional ni el modelo del convertidor. En [16], los autores sostienen que las tareas de balanceo de voltajes y de seguimiento de la referencia de voltaje se encuentran acopladas, lo que se vuelve un problema serio en aplicaciones de alto ancho de banda y alta precisión. Hacen énfasis en el desacoplamiento de dichas tareas mediante dos técnicas: linealización por retroalimentación y una variante de modulación de espacio vectorial. Aplican controladores de tipo proporcional-integral (PI) y regulador cuadrático lineal (LQR) para el seguimiento de voltaje y simples controles proporcionales (P) para el balanceo

de los voltajes en los capacitores.

El objetivo del presente trabajo es el control por seguimiento de una señal de referencia sinusoidal aplicado al voltaje de salida de un CMCF. La tarea del balanceo de los voltajes en los capacitores flotantes se delega a la modulación PS-PWM. Con ello se evita el uso de múltiples sensores de voltaje y se reduce la complejidad del modelo dinámico del convertidor así como la complejidad en la implementación del controlador. El controlador está basado en la técnica de rechazo activo de perturbaciones (ADRC, por sus siglas en inglés, Active Disturbance Rejection Control).

En la sección 2.1 se describen las partes que componen al sistema: controlador, modulador y el convertidor de potencia. En la sección 2.2 se obtiene el modelo dinámico en forma promedio del CMCF. En la sección 2.3 se realiza la linealización en forma exacta del modelo del CMCF. El diseño del controlador basado ADRC es presentado en la sección 2.4. La sección 3 muestra los resultados de la cosimulación realizada en Matlab-Simulik/PSIM, donde se analiza la efectividad del controlador antes de la construcción experimental, los resultados experimentales se muestran en la sección 4 y, finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones.

2. Materiales y métodos

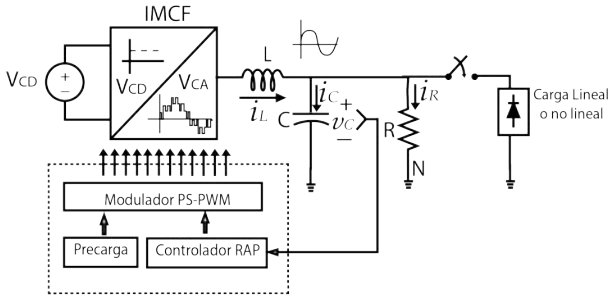


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema

En la Figura 1 se muestra el sistema completo el cual se describe a continuación. A partir de una fuente de voltaje de corriente directa, V_{CD}, el CMCF sintetiza en la salida una señal de múltiples niveles de voltaje basada en PWM. Dicha salida de voltaje es procesada por un filtro pasivo de tipo LC pasa-bajas con el fin de atenuar las componentes de alta frecuencia de la señal PWM y finalmente, obtener una señal de voltaje sinusoidal pura en la salida del filtro. El controlador por rechazo activo de perturbaciones retroalimenta la señal de voltaje del filtro y la compara contra una señal de referencia, de tipo sinusoidal con frecuencia de 60 Hz y amplitud variable; la señal de referencia o moduladora se emplea para el modulador PS-PWM. Durante el encendido del CMCF, los capacitores flotantes están descargados, por lo tanto, por medio del proceso de precarga, se establece el voltaje correcto, o voltaje nominal, en cada uno de ellos. Inicialmente se conecta una carga del tipo resistivo con valor conocido en paralelo al capacitor C del filtro de salida y en determinado momento, se añade una carga de tipo lineal o no lineal como perturbación exógena al sistema.

El CMCF se muestra en la Figura 2, este se compone de múltiples celdas de potencia conectadas una después de otra. Cada celda de potencia (excepto la que está conectada al bus de CD), contiene un par de interruptores de potencia y un capacitor flotante.

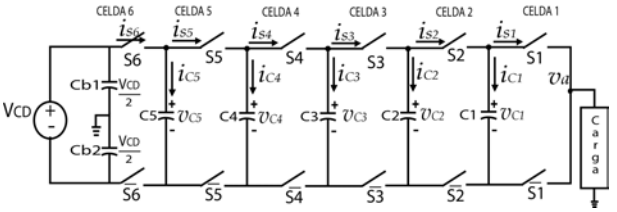


Figura 2. Topología del Inversor multinivel de capacitores flotantes (CMCF)

Por ejemplo, la celda 1 se compone de los interruptores $S1$, $\bar{S}1$ y del capacitor $C1$. Para formar siete niveles de voltaje, incluyendo el nivel correspondiente a $0V$, se requieren seis celdas. Cada capacitor flotante de la celda i-ésima, debe ser cargado y se debe mantener a un nivel nominal de voltaje V_{Ci} el cual puede corresponder con alguno de los siguientes valores: $V_{CD}/6, 2V_{CD}/6, 3V_{CD}/6, 4V_{CD}/6, 5V_{CD}/6$.

Individualmente, cada interruptor del convertidor puede estar cerrado (ON) o abierto (OFF). Con el fin de evitar cortocircuitos en las celdas, los interruptores de cada celda deben operar en forma complementaria, por lo que nunca deben permanecer cerrados al mismo tiempo; esta condición se garantiza empleando un tiempo muerto entre conmutaciones. En la topología de capacitores flotantes, así como en otras topologías multinivel, un mismo nivel de voltaje puede ser formado con distintos estados de conmutación, los cuales se denominan estados redundantes. En la topología de CMCF de medio puente de siete niveles, se pueden obtener en la salida los siguientes niveles de voltaje: $-3V_{CD}/6$, $-2V_{CD}/6$, $-V_{CD}/6$, 0, $V_{CD}/6$, $2V_{CD}/6$, $3V_{CD}/6$.

2.1. Modelo dinámico en forma promedio

Aplicando leyes de corriente de Kirchhoff al CMCF mostrado en la Figura 2 se obtiene el conjunto de ecuaciones para las corrientes en los capacitores flotantes:

$$
\begin{aligned}
C_1\frac{dv_{C1}}{dt} &= i_L(d_2-d_1)\\
C_2\frac{dv_{C2}}{dt} &= i_L(d_3-d_2)\\
C_3\frac{dv_{C3}}{dt} &= i_L(d_4-d_3)\\
C_4\frac{dv_{C4}}{dt} &= i_L(d_5-d_4)\\
C_5\frac{dv_{C5}}{dt} &= i_L(d_6-d_5)
\end{aligned}
\tag{1}
$$

donde i_L es la corriente en el inductor del filtro de salida, C_i es la capacitancia de los capacitores del CMCF, d_i representa el ciclo de trabajo del interruptor S_i y v_{Ci} son los voltajes en los capacitores flotantes, con $i = \{1,2,3,4,5\}$. El voltaje de salida del CMCF de la Figura 2, se mide desde el nodo v_a respecto a tierra y se nombra como v_{aN}, el cual se determina de la siguiente manera:

$$
\begin{aligned}
v_{aN} = v_{C1}(d_1-d_2) + v_{C2}(d_2-d_3) + v_{C3}(d_3-d_4) +\\
v_{C4}(d_4-d_5) + v_{C5}(d_5-d_6) + V_{CD}d_6 - \frac{V_{CD}}{2}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

La modulación PS-PWM genera las señales PWM para cada par de interruptores de las celdas del CMCF. En la Figura 3(a) se muestran algunos ciclos de las señales portadoras $C1$ a $C6$, las cuales son señales triangulares con amplitudes que toman los valores de $[-1,1]$ y frecuencia f_c, desfasadas entre sí 60 grados. La frecuencia de las portadoras es mayor que la frecuencia de la moduladora f_m, por lo que es común definir un índice de modulación $\frac{f_c}{f_m} \geq i_m$. En este trabajo se empleó para modulación un índice de modulación $i_m = 40$. Para el caso de la señal moduladora u_{av}, toma valores de amplitud de $[-1,1]$ y posee una frecuencia $f_m = 60\ Hz$.

Cada señal portadora es comparada con la moduladora; para obtener las señales PWM tal como se puede observar en la Figura 3(b) originando las señales PWM nombradas como $V_a - V_f$, las cuales tienen el mismo ciclo de trabajo d.

Al aplicar esta señal al CMCF de siete niveles, todos los interruptores tienen el mismo ciclo de trabajo, es decir:

$$
d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = d_6 = d \tag{3}
$$

Acorde con la Ecuación (1), la variación del voltaje promedio en cada capacitor flotante es nula cuando todos los ciclos de trabajo, $d_1 a d_6$, son iguales. Por lo tanto, las dinámicas de voltaje en los capacitores flotantes de (1) se pueden considerar constantes y sus derivadas iguales a cero. Esta es la razón por la que la dinámica de los capacitores puede no considerarse en el modelo promedio del CMCF.

Por otra parte, existe una relación entre ciclo de trabajo d y la señal moduladora u_{av}, la cual se expresa como $d = \frac{u_{av}}{/}2 + 0.5$. Tomando en cuenta esto y sustituyendo (3) en (2), el voltaje de salida V_{aN} puede expresarse como sigue:

$$
v_{aN} = V_{CD}(d) - \frac{V_{CD}}{2} = \frac{V_{CD}}{2}u_{av} = Eu_{av} \tag{4}
$$

Donde E es el voltaje de cada uno de los capacitores $Cb1$ y $Cb2$, mismo que tiene por valor a $V_{CD}/2$. La ecuación (4) permite ver de manera simplificada al CMCF de siete niveles como un convertidor «reductor» multinivel con una fuente de voltaje de alimentación Eu_{av} (donde $E = V_{CD}/2$), un filtro LC pasabajas y una carga de naturaleza variante, tal como se muestra en la Figura 4.

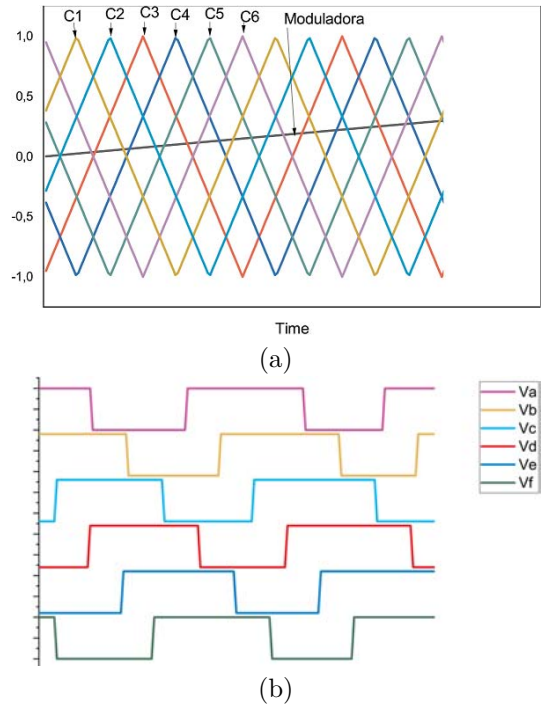


Figura 3. Modulación PS-PWM: (a) Portadoras de la modulación; (b) Ciclo de trabajo en los canales PWM generados

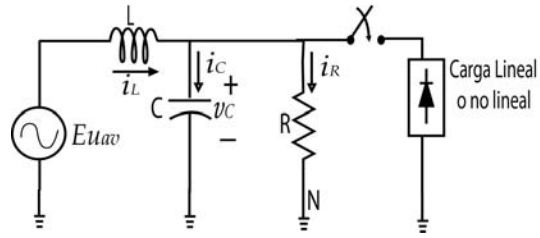


Figura 4. Modelo simplificado del inversor multinivel de capacitores flotantes

Tomando en consideración lo anterior, el modelo promedio de segundo orden del CMCF se puede expresar como en (5):

$$\begin{aligned} L\frac{di_L}{dt} &= -v_C + Eu_{av} \\ C\frac{dv_C}{dt} &= i_L - \frac{v_C}{R} \end{aligned} \tag{5}$$

La entrada de control u_{av}, representa la señal moduladora PWM que puede tomar valores del conjunto continuo $[-1, 1]$. El término v_C es el voltaje en el capacitor del filtro. La corriente que circula por los interruptores y por la inductancia de salida es i_L. L y C son los valores de inductancia y capacitancia del filtro, respectivamente.

2.2. Linealización en forma exacta del modelo

El sistema CMCF así conformado es lineal, de una entrada y una salida (SISO, por sus siglas en inglés, Single Input-Single Output) y como ya se mencionó es de naturaleza reductora. Reagrupando el modelo mostrado en la Ecuación (5) para ser expresado en su forma no lineal afín, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{6}$$

donde:

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{v_C}{L} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{v_C}{RC} \end{pmatrix}, \quad g(x) = \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix}$$

y:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix}$$

Como se describe ampliamente en [17], la función de salida que permite linealizar en forma exacta al sistema no lineal (6) está dada como:

$$h(x) = v_C \tag{7}$$

El grado relativo r del sistema no lineal (6) se obtiene mediante el cálculo sucesivo de las derivadas de Lie:

$$L_g L_f^k h(x) = 0 \tag{8}$$

hasta encontrar la derivada de Lie que cumple con:

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0 \tag{9}$$

donde $k < r - 1, \forall x \in \Omega$. Las derivadas de Lie calculadas son:

$$\begin{aligned} L_g L_f^0 h(x) = L_g h(x) &= \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

$$L_g L_f^1 h(x) = \frac{\partial [L_f h(x)]}{\partial x} g(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{E}{LC} \tag{11}$$

Dado que (11) es diferente de 0, el grado relativo r del sistema (6) es igual a 2. Se realiza la transformación de coordenadas $\mathbf{x}$ a $\mathbf{z}$ mediante:

$$\mathbf{z} = \mathbf{\Phi}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_f^0 h(x) \\ L_f^{n-1} h(x) \end{pmatrix} \tag{12}$$

Para verificar si $\mathbf{\Phi}$ es un difeomorfismo, se verifica la no-singularidad de la matriz jacobiana, dada por:

$$\mathbf{J_\Phi} = \frac{\partial \mathbf{\Phi}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial z_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial z_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \tag{13}$$

De (13) se puede demostrar que $\mathbf{J_\Phi}$ es no singular para cualquier $\mathbf{x}$ por lo que la transformación de coordenadas es válida. El sistema de coordenadas $\mathbf{z}$ se expresa como:

$$\begin{aligned} z_1 &= v_C \\ z_2 &= \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_C \end{aligned} \tag{14}$$

El sistema original (6) se transforma en el sistema linealizado en la forma normal de Brunovsky tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= \alpha(x) + \beta(x)u = v \end{aligned} \tag{15}$$

Donde:

$$\alpha(x) = (\frac{1}{C^2R^2} - \frac{1}{LC})v_C - \frac{1}{C^2R} i_L \tag{16}$$

$$\beta(x) = L_g L_f^1 h(x) = \frac{E}{LC} \tag{17}$$

La variable v es una la ley de control auxiliar cuya expresión se planteará más adelante y definirá la dinámica de seguimiento que se desea cumpla el sistema. La ley de control se obtiene despejando u de (15), como sigue:

$$u = \frac{v - \alpha(x)}{\beta(x)} \tag{18}$$

El modelo mostrado en (5) del CMCF considera una carga resistiva R de valor conocido, pero dado que el inversor está sujeto a cargas de naturaleza variante, la corriente de carga i_L cambiará su valor dependiendo de la carga, por lo tanto, se causarán perturbaciones en el voltaje de salida del inversor. Como se puede observar, la ley de control de la Ecuación (18), requiere el valor de $\alpha(x)$, el cual a su vez, requiere la medición de i_L. Una propuesta para evitar el uso del sensor de corriente se trata a continuación.

2.3. Diseño del controlador ADRC

Basándose en el enfoque ADRC con observador de estado extendido, se diseña un observador LESO [18], para su formulación se realizan las siguientes suposiciones:

1. Solo se mide la salida plana $F = v_C$.
2. Los valores nominales de los parámetros L, C, R, E son conocidos.
3. La entrada de control u_{av} está disponible.
4. La función de perturbación $\alpha(x)$ es desconocida, pero se considera acotada.
5. Las variables estimadas de la salida plana y su derivada se denotan como $F_1 = \widehat{F}$ y $F_2 = \widehat{\dot{F}}$.
6. Las variables estimadas de la función de perturbación y su derivada, son $\eta_1 = \widehat{\alpha(x)}$ y $\eta_2 = \widehat{\dot{\alpha}(x)}$.

El observador LESO se diseña a partir de (15) y se define como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{F}_1 &= F_2 + \lambda_3(F - F_1) \\ \dot{F}_2 &= \eta_1 + \beta(x)u + \lambda_2(F - F_1) \\ \dot{\eta}_1 &= \eta_2 + \lambda_1(F - F_1) \\ \dot{\eta}_2 &= \lambda_0(F - F_1) \end{aligned} \tag{19}$$

El conjunto de coeficientes $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ son valores constantes y son seleccionados mediante un polinomio Hurtwitz de cuarto orden:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \omega_n^4 \\ \lambda_1 &= 4\zeta\omega_n^3 \\ \lambda_2 &= 2\omega_n^2 + 4\zeta^2\omega_n^2 \\ \lambda_3 &= 4\zeta\omega_n \end{aligned} \tag{20}$$

Partiendo de (18) y de (19) se diseña el control ADRC, donde los valores estimados del observador LESO son adaptados al controlador auxiliar de seguimiento:

$$v = \dot{F}_2^* - k_1(F_2^* - z_2) - k_0(F_1^* - z_1) \tag{21}$$

Donde las señales de seguimiento son:

$$\begin{aligned} F_1^* &= A\sin(\omega_n t) \\ F_2^* &= -A * \omega_n \cos(\omega_n t) \\ \dot{F}_2^* &= A(\omega_n)^2 \sin(\omega_n t) \end{aligned} \tag{22}$$

Con $\omega_n = 2\pi f$ y $f = 60$ Hz.

La ley de control basada en la técnica ADRC se establece como sigue:

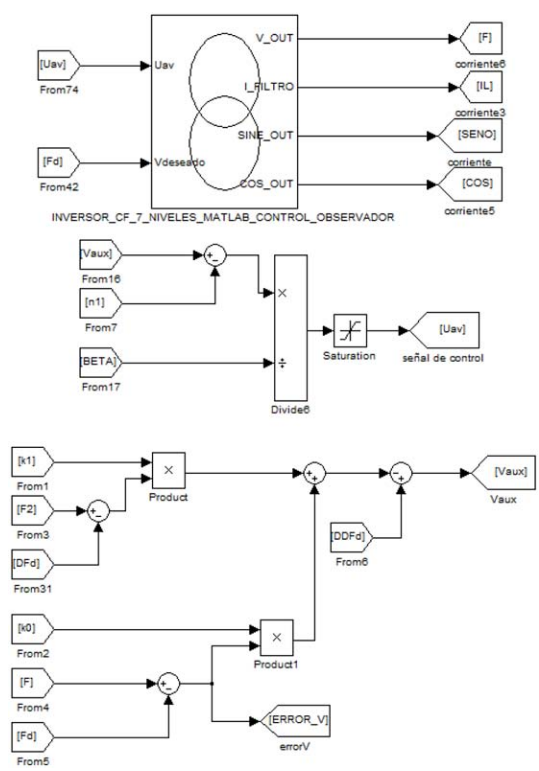
$$u = \frac{v - \eta_1}{\beta(x)} \tag{23}$$

En (22), η_1 representa el valor estimado de $\alpha(x)$, es decir, $\eta_1 = \widehat{\dot{\alpha}(x)}$. Los coeficientes k_0, k_1 son valores constantes, seleccionados mediante un polinomio Hurwitz de segundo orden como se muestra a continuación:

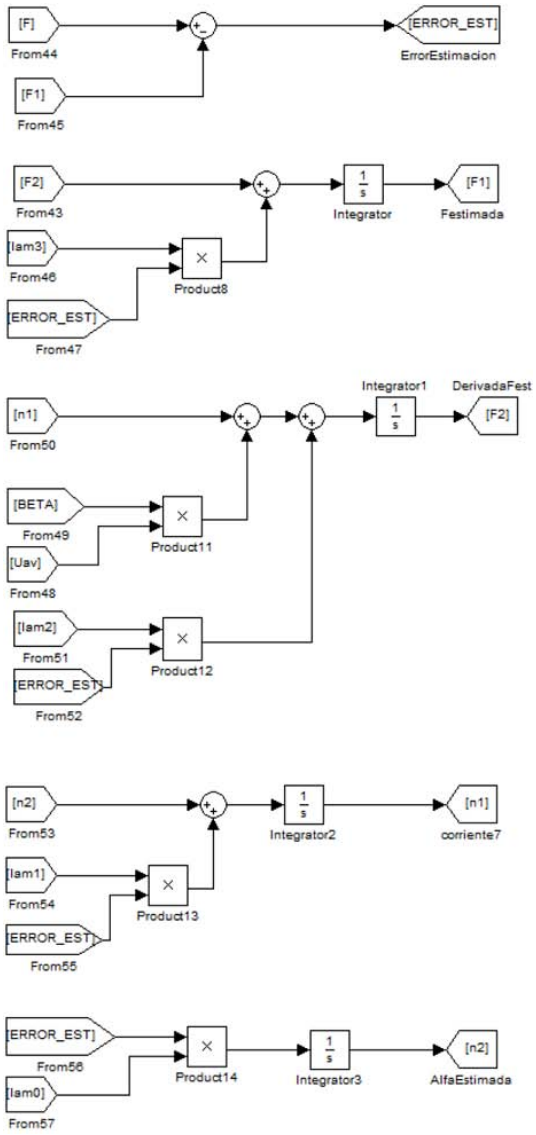
$$\begin{aligned} k_0 &= w_{nc}^2 \\ k_1 &= 2\zeta_c w_{nc} \end{aligned} \tag{24}$$

3. Simulación del sistema

La simulación del sistema se llevó a cabo usando el módulo SimCoupler y fue realizada por medio de una cosimulación entre PSIM 9.0 y MATLAB/Simulink. El controlador se construye en MATLAB/Simulink, esto se muestra en la Figura 5. Por otra parte, en PSIM se realiza la construcción del circuito de precarga y los elementos del inversor multinivel (filtro de salida, modulador PS-PWM y el control para cambios de carga), esto se muestra en la Figura 6. Por tanto, el procesamiento del controlador se realiza en MATLAB/Simulink y se acopla por medio del módulo SimCoupler a PSIM; el valor de la señal de control acoplada tiene por nombre u_{av} y la recibe el modulador PS-PWM como ciclo de trabajo para realizar la acción de control sobre la salida del CMCF.



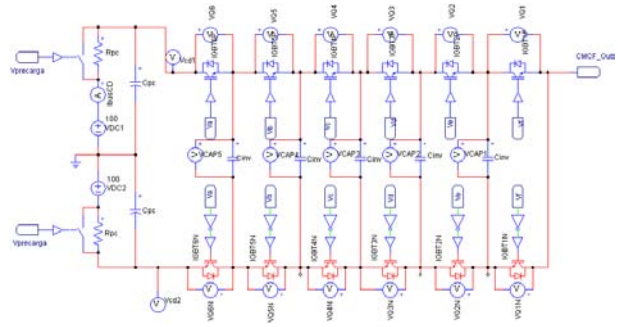
(a)



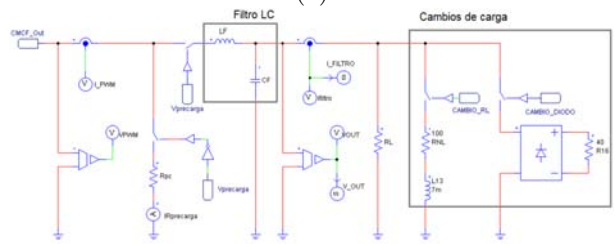
(b)

Figura 5. MATLAB/Simulink: (a) Control ADRC y (b) Observador LESO

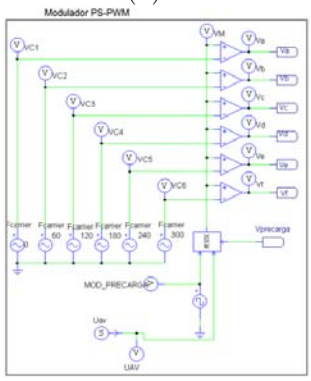
Para todos los componentes pasivos empleados se consideraron valores nominales de placa con una tolerancia de 20 % para capacitores y de 10 % para resistores e inductores; por lo tanto, para el convertidor multinivel se emplearon los siguientes valores: $C_{CAP1...CAP5} = 10\ \mu F$; los capacitores del bus de CD tienen un valor de $C_{PC} = 1000\ \mu F$. Los valores de los elementos del filtro de salida son $C_F = 4.7\ \mu F$, $L_F = 7\ mH$ y $R_L = 100\ \Omega$. La señal de referencia de voltaje es igual a $Vd = A\sin(2\pi f)$, las pruebas se realizaron para una amplitud deseada de $A = 80\ V$ y una frecuencia $f = 60\ Hz$. Por otra parte, la modulación PS-PWM utiliza portadoras con frecuencia de 2.4 kHz. El valor de los parámetros para el observador LESO $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ se calculan con $w_n = 30000$ y $\zeta = 0.707$. Los parámetros del controlador k_0 y k_1 se calculan con $w_{nc} = 3000$ y $\zeta_c = 0.707$. En ambos casos los polos se ubican en el lado izquierdo del plano complejo a fin de garantizar la estabilidad.



(a)



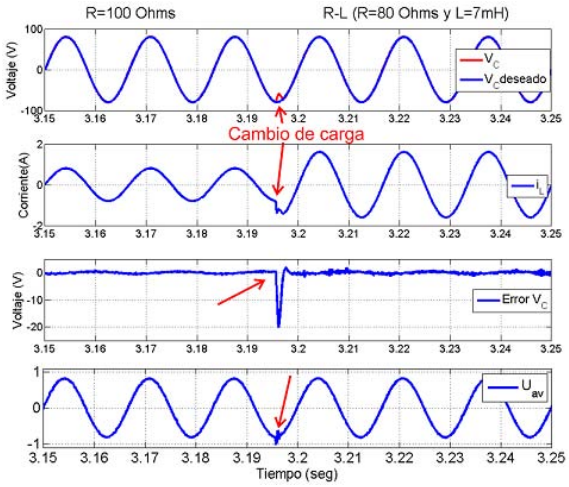
(b)



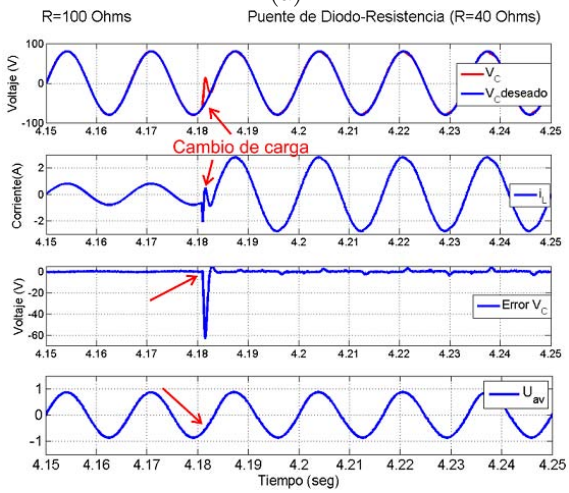
(c)

Figura 6. PSIM: (a) Inversor multinivel. (b) Filtro LC a la salida y control de cambio de carga y. (c) Modulador PS-PWM y activación de cambios de carga

Para comprobar la robustez del controlador ADRC ante cambios repentinos de carga se realizaron dos tipos de pruebas: para una primera prueba, se añade a la salida del inversor, después del filtro, una carga adicional del tipo $R - L$, con valores nominales de $R_{NL1} = 80\ \Omega$ y $L_{NL} = 7\ mH$. El resultado de la simulación se muestra en la Figura 7(a); en esta se puede observar que al realizar el cambio de carga, la corriente i_L incrementa su valor y el estimador LESO en conjunto con el controlador ADRC actualizan la señal de control $u_a v$, permitiendo que el voltaje del capacitor retome la trayectoria de referencia nuevamente.



(a)



(b)

Figura 7. Resultados de simulación: (a) Con carga adicional del tipo $R-L$. (b) Con carga adicional compuesta por un puente de diodos y una resistencia

La segunda prueba consistió en agregar ahora una carga no lineal que consiste en un puente de diodos junto a una carga resistiva de 40 Ω. La Figura 7(b) muestra el resultado de la simulación donde se puede observar que al agregar la carga no lineal produce que el voltaje en el capacitor sufra una fuerte desviación transitoria de la referencia sinusoidal deseada, misma que es corregida de la misma manera por la acción del estimador LESO y el controlador ADRC.

En la Figura 8 se observa el resultado de la simulación ya con el controlador, del comportamiento del voltaje en los capacitores flotantes durante los cambios de carga realizados en las pruebas anteriores. La precarga de los capacitores flotantes se realiza de acuerdo con el trabajo presentado en [7], ahí proponen un intervalo de tiempo de $t = [0-2]$s. Al realizar los cambios de carga, se observa que los voltajes en los capacitores flotantes se mantienen en forma promedio en sus valores nominales; el rizo se incrementa, siendo mayor cuando se le conecta la carga no lineal del diodo + resistencia. Para validar el efecto del controlador sobre el voltaje de salida v_C se realizaron dos pruebas en simulación, la primera, prueba es sin controlador, solo con el modulador PS-PWM; el resultado de esta prueba se puede observar en la Figura 9(a). En la segunda prueba se coloca el controlador propuesto, el resultado se puede apreciar en la Figura 9(b). En esta prueba el voltaje del capacitor v_C se mantiene sin cambios o muy poco perceptible cercano a la referencia. En este punto y analizando las figuras mencionadas, se puede argumentar que la modulación PS-PWM por sí misma, no sería capaz de mantener el voltaje de salida.

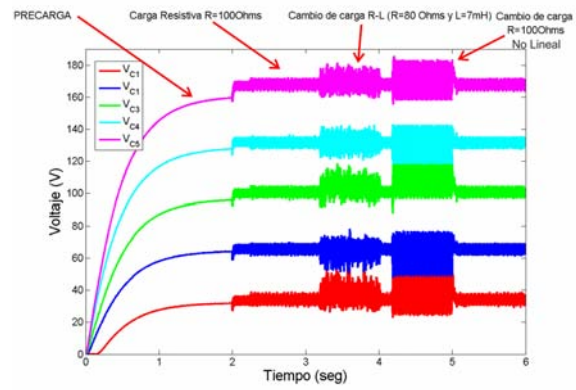
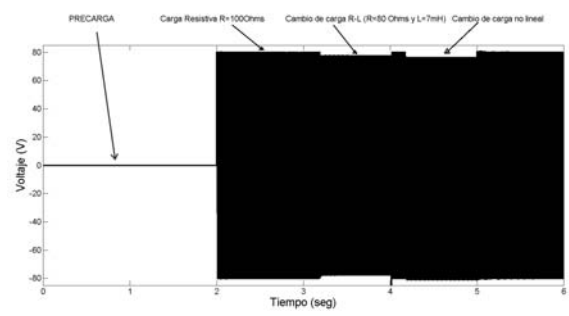
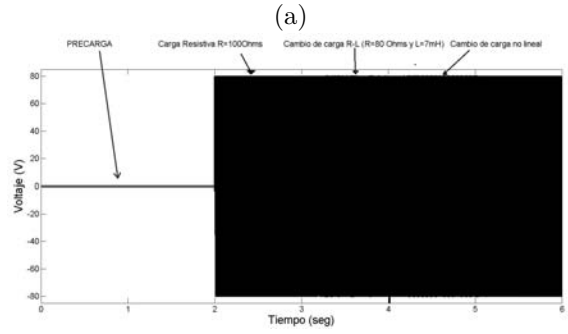


Figura 8. Resultado de simulación de los voltajes en los capacitores flotantes durante la precarga, operación normal y cambios de carga



(a)



(b)

Figura 9. Resultados de simulación para el voltaje de salida v_C: (a) Con cambios de carga solo con el modulador PS-PWM. (b) Con cambios de carga aplicando el controlador + estimador LESO

4. Resultados experimentales

Para verificar los resultados de simulación se realizó la implementación del sistema que consistió en dos partes principales: la primera, contempla la construcción del prototipo del convertidor multinivel y los sistemas auxiliares para su funcionamiento, la descripción del mismo se muestra en la Figura 10.

La segunda parte, es la implementación en un FPGA de los algoritmos del controlador ADRC y el modulador PS-PWM. En [19] se recomienda seguir la metodología *top-down* que es muy adecuada para implementar algoritmos en los dispositivos de lógica reconfigurable y que ha sido usada con excelente desempeño en [14], [20–22]. Para llevar a cabo la implementación se empleó el *software* de Xilinx ISE 14.7, se codificó en VHDL sin hacer uso de alguna herramienta de alto nivel basada en bloques o generación de código, y se ocuparon los elementos internos del FPGA, tales como memorias BRAM y multiplicadores embebidos para optimizar el uso de recursos internos del dispositivo; el diseño realizado se muestra en la Figura 11. Cabe mencionar que para las operaciones aritméticas necesarias se utilizó la representación numérica en punto flotante simple de 32-bits alineado al estándar IEEE-754 y se logró un tiempo de muestreo de 10 μs.

Para evaluar el desempeño del controlador se realizaron al igual que en simulación, dos tipos de pruebas: en lazo abierto y en lazo cerrado. En ambos casos se hicieron cambios de carga del tipo lineal y no lineal para verificar el desempeño del controlador propuesto.

De manera inicial se probó el prototipo para verificar su funcionamiento correcto, el resultado de esta prueba se muestra en la Figura 12. En la Figura12(a) se puede observar la salida con siete niveles que se toma antes del filtro de salida; las Figura 12 (b) y (c) muestran la salida sinusoidal después del filtro LC para voltaje y la corriente suministrada, respectivamente.

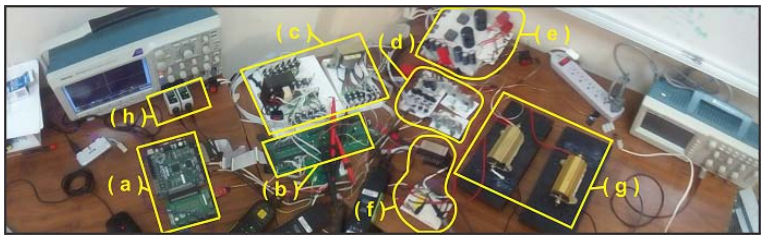


Figura 10. Prototipo desarrollado del inversor multinivel de siete niveles de capacitores flotantes. (a) Tarjeta de desarrollo basada en FPGA (Nexys-2). (b) Inversor multinivel. (c) Fuentes aisladas para impulsores de compuerta e instrumentación. (d) Control de precarga de capacitores y cambio de carga a la salida. (e) Fuente principal de CD. (f) Filtro LC a la salida del inversor. (g) Cargas a la salida del inversor (200 W). (h) Puntas aisladas de medición.

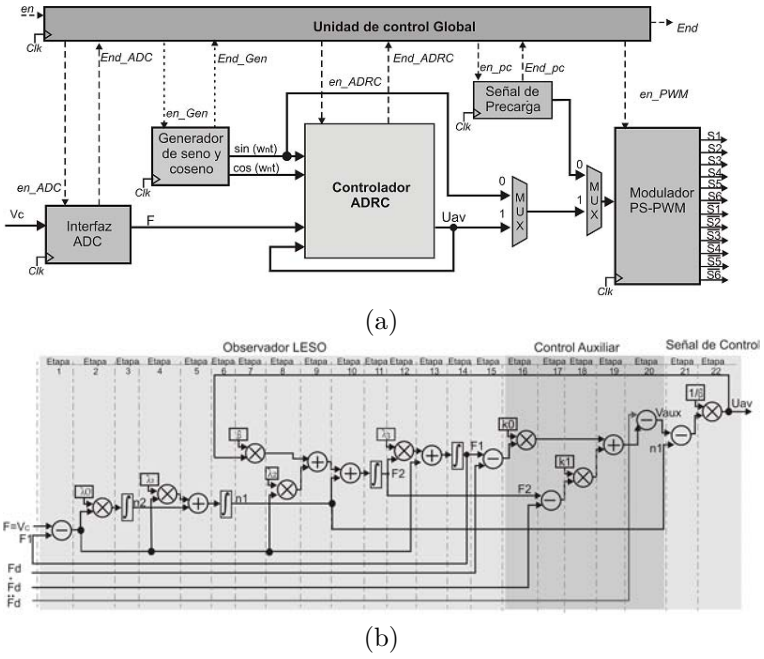


Figura 11. Implementación en el dispositivo FPGA. (a) Diagrama a bloques propuesto. (b) Arquitectura diseñada para la ejecución del algoritmo de control y LESO

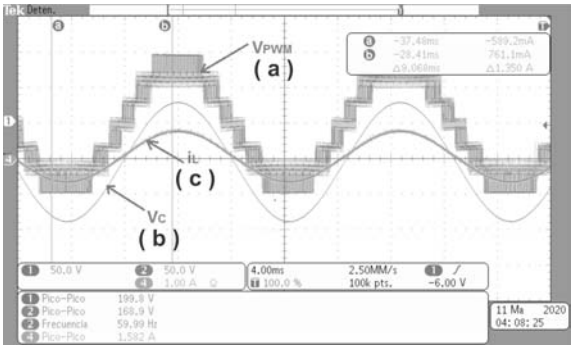


Figura 12. Formas de onda de salida obtenidas del prototipo experimental. (a) Salida de voltaje multinivel de 7 niveles antes del filtro LC (V_{PWM}). (b) Salida de voltaje después del filtro LC (V_C). (c) Corriente suministrada a la carga (i_L)

Para validar el contenido armónico de la onda de salida del inversor se realizó una prueba con un medidor de calidad de energía (Hioki 3197), el resultado se muestra en la Figura 13, se observa una alta calidad en la onda de salida, tanto en voltaje (THD_v) como en corriente (THD_i).

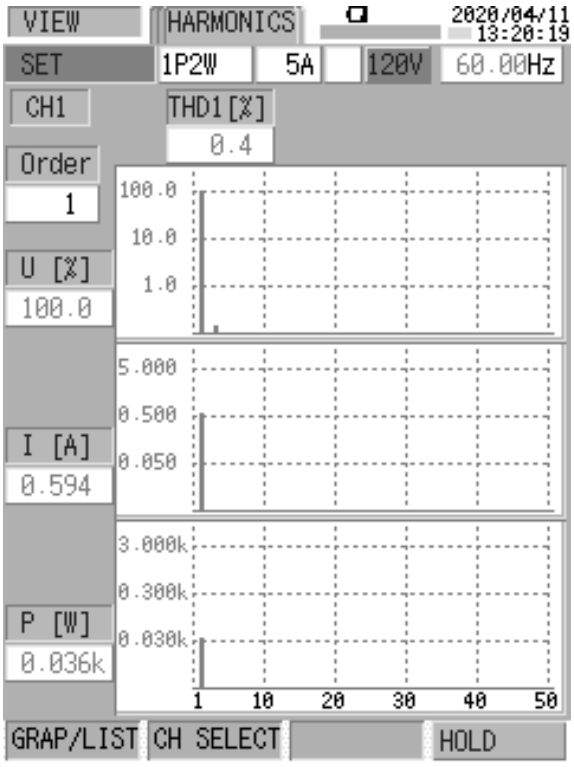


Figura 13. Resultado de la medición de THD_v y THD_i de la salida del inversor multinivel

Como resultado de la prueba en lazo abierto la Figura 14 muestra los resultados de tres aspectos que consideramos importantes: la señal de control (u_{av}), el voltaje de salida del convertidor (v_C) y el voltaje de los capacitores ($V_{C1...C5}$). Como ya se ha comentado anteriormente, se realizaron cambios de carga del tipo lineal y no lineal. En la Figura14(a) se muestra el valor de la señal de control con una amplitud fija después de la precarga con un valor de $u_{av} = 0.85$, el equivalente a un valor deseado de voltaje de salida $V_C = 85$ V, el cual se puede observar en la Figura14(b) cuando el sistema es sometido a cambios de carga repentinos. En esta figura podemos observar claramente que durante los transitorios, la amplitud del voltaje se ve afectado, ya que disminuye. En la Figura 14(c) se observa que el balance de los capacitores se mantiene nominalmente dentro de su zona de trabajo, sin embargo, al momento de realizar los cambios de carga se puede apreciar un incremento en el rizo de cada uno de ellos.

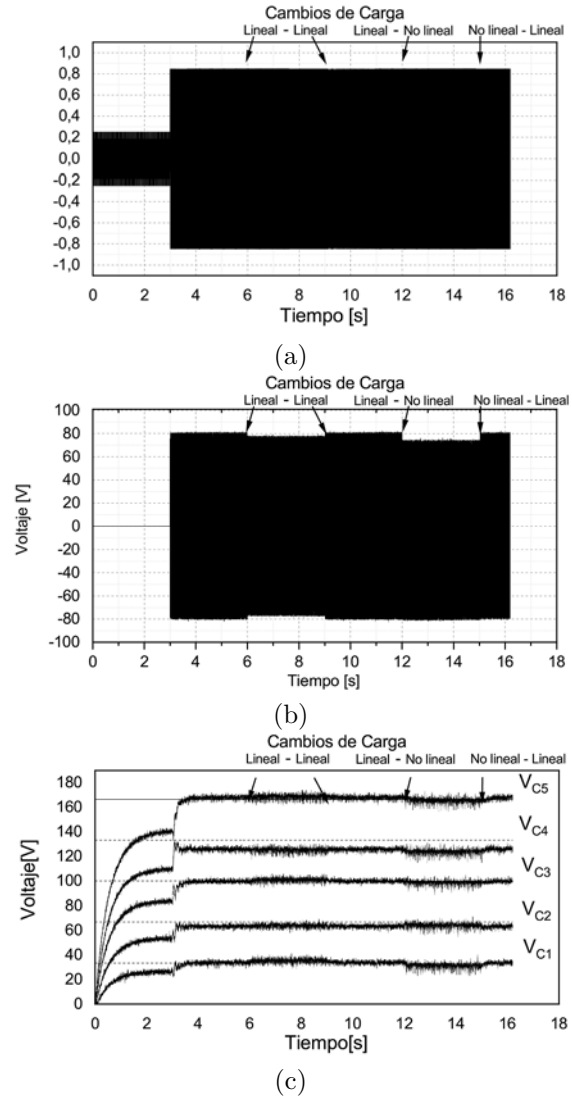


Figura 14. Gráficos de los resultados experimentales obtenidos en lazo abierto ante diferentes cambios de carga. (a) Señal de control (u_{av}). (b) Voltaje de salida del inversor despues del filtro (V_C). (c) Voltaje en los capacitores flotantes $V_{C1...C5}$

La prueba en lazo cerrado se realizó bajo el mismo procedimiento que el llevado a cabo para la prueba en lazo abierto. La Figura 15(a) muestra el resultado de

la señal de control; después del periodo de precarga, se establece un valor inicial de $u_{av} = 0.85$ para un valor deseado de $V_C = 85$ ëV, en la misma figura se puede observar la acción del controlador (u_{av} variable) durante la conexión repentina de las cargas. La Figura 15(b) muestra que el voltaje de salida no modifica su amplitud cuando se realizan los cambios de carga. En la Figura 15(c) se muestra el voltaje de los capacitores los cuales mantienen el balance y solo se aprecia un incremento de alta frecuencia en cada uno de ellos.

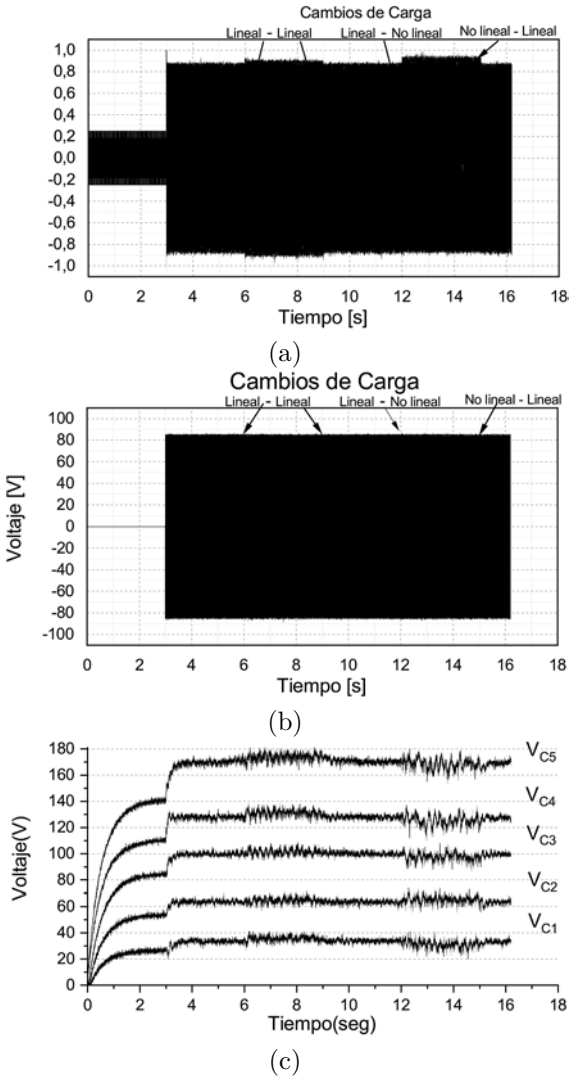


Figura 15. Gráficos de los resultados experimentales obtenidos en lazo cerrado ya con el controlador ADRC ante diferentes cambios de carga. (a) Señal de control (u_{av}). (b) Voltaje de salida del inversor después del filtro (V_C). (c) Voltaje en los capacitores flotantes $V_{C1...C5}$

5. Conclusiones

En términos generales se observa que la disminución en la complejidad del modelo del CMCF ayudó considerablemente en otros aspectos tales como la reducción de la capacidad de cómputo necesaria para procesar el controlador, reducción en el tiempo de procesamiento y a emplear menos sensores en el prototipo.

Por otra parte, se puede comentar que es necesario que la modulación PS-PWM mantenga el balance de voltaje de los capacitores flotantes para que el control ADRC funcione, es decir, realice el seguimiento de la referencia de voltaje, sin embargo, la modulación PS-PWM no es capaz de mantener el voltaje deseado a la salida en su valor nominal cuando se presentaron perturbaciones en la corriente de carga.

Al agregar el controlador ADRC, la tarea de control se lleva a cabo de manera efectiva. El controlador ADRC y el observador LESO tratan con efectividad la perturbación de corriente, por lo que podemos considerar al controlador robusto ante perturbaciones exógenas provocadas por cambios de carga de tipo lineal y no lineal. La señal de voltaje en el capacitor del filtro sigue efectivamente a la referencia impuesta, salvo desviaciones transitorias, que rápidamente son minimizadas por el controlador. Hay que considerar que en el caso de desbalance de los capacitores, el control ADRC no es capaz de seguir la referencia de voltaje.

El uso del dispositivo de lógica programable para la implementación del sistema, como bien se observa en las pruebas experimentales, contribuyó a tener muy buenos resultados, sobre todo, en términos de rapidez de ejecución del algoritmo y atención a las perturbaciones.

Se verificó que los inversores multinivel poseen entre sus características principales una alta calidad en la onda de salida ($THD_v < 5$ %, como lo marca el estándar IEEE-519) y que la topología de capacitores flotantes, al requerir solo una fuente de CD, es una opción recomendable entre las otras estructuras multinivel ya existentes.

Referencias

[1] D. Hart, *Electrónica de potencia.* Madrid: Pearson Education, 2001. [Online]. Available: https://bit.ly/3eJZYXH

[2] R. Haider, R. Alam, N. B. Yousuf, and K. M. Salim, "Design and construction of single phase pure sine wave inverter for photovoltaic application," in *2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV).* IEEE, may 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/iciev.2012.6317332

[3] L. Franquelo, J. Rodríguez, J. León, S. Kouro, R. Portillo, and M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, jun 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/mie.2008.923519

[4] S. A. González, S. A. Verne, and M. I. Valla, *Multilevel Converters For Industrial Applications.* Taylor & Francis Ltd, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/3eN3PUc

[5] Y. Lei, C. Barth, S. Qin, W.-C. Liu, I. Moon, A. Stillwell, D. Chou, T. Foulkes, Z. Ye, Z. Liao, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "A 2 kW, single-phase, 7-level, GaN inverter with an active energy buffer achieving 216 w/in^3 power density and 97.6% peak efficiency," in *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).* IEEE, mar 2016. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/apec.2016.7468068

[6] D. Janik, T. Kosan, P. Kamenicky, and Z. Peroutka, "Universal precharging method for dc-link and flying capacitors of four-level flying capacitor converter," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* IEEE, nov 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700175

[7] S. Thielemans, B. Reznikov, J. Melkebeek, and A. Ruderman, "Self-precharge for single-leg odd-level multilevel converter," in *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010).* Institution of Engineering and Technology, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1049/cp.2010.0142

[8] C. Feng, J. Liang, and V. G. Agelidis, "Modified phase-shifted PWM control for flying capacitor multilevel converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 1, pp. 178–185, jan 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/tpel.2006.886600

[9] M. Trabelsi and L. Ben-Brahim, "Experimental photovoltaic power supply based on flying capacitors multilevel inverter," in *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP).* IEEE, jun 2011. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/iccep.2011.6036314

[10] A. M. Y. M. Ghias, J. Pou, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "Voltage balancing method for the multilevel flying capacitor converter using phase-shifted PWM," in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon).* IEEE, dec 2012. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/pecon.2012.6450221

[11] G. Gateau, M. Fadel, P. Maussion, R. Bensaid, and T. A. Meynard, "Multicell converters: active control and observation of flying-capacitor voltages," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 998–1008, oct 2002. [Online]. Available: http://doi.org/10.1109/tie.2002.803200

[12] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics.* Springer US, 2001. [Online]. Available: http://doi.org/10.1007/b100747

[13] H. Miranda, V. Cárdenas, G. Espinosa-Pérez, and D. Noriega-Pineda, "Multilevel cascade inverter with voltage and current output regulated using a passivity - based controller," in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting.* IEEE, oct 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/IAS.2006.256643

[14] 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: http://doi.org/10.1109/tii.2013.2242085

[15] F. J. Chavero Ramírez, H. J. C. López Tapia, and N. V. Nava, "Estrategia de control para inversor multinivel con capacitores flotantes," *Pistas educativas*, vol. 108, no. 35, 2014. [Online]. Available: https://bit.ly/3eNaVIk

[16] M. Caris, H. Huisman, J. Duarte, and E. Lomonova, "Nonlinear and vector closed-loop control methods for flying-capacitor power converters," *International Journal of Electronics*, vol. 104, no. 8, pp. 1298–1316, mar 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00207217.2017.1293739

[17] D. Bhattacharyya, S. Padhee, and K. C. Pati, "Modeling of DC–DC converter using exact feedback linearization method: A discussion," *IETE Journal of Research*, vol. 65, no. 6, pp. 843–854, may 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/03772063.2018.1454345

[18] B.-Z. Guo and Z.-L. Zhao, *Active disturbance rejection control for nonlinear systems: An introduction.* John Wiley & Sons, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/9781119239932

[19] H. Kaeslin, *Top-down digital VLSI design: from architectures to gate-level circuits and FPGAs.* Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/36WnwGh

[20] E. Monmasson, L. Idkhajine, I. Bahri, M-W-Naouar, and L. Charaabi, "Design methodology and FPGA-based controllers for power electronics and drive applications," in *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.* IEEE, jun 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICIEA.2010.5515585

[21] J. A. Juárez-Abad, A. P. Sandoval-García, J. Linares-Flores, J. F. Guerrero-Castellanos, P. Banuelos-Sánchez, and M. A. Contreras-Ordaz, "FPGA implementation of passivity-based control and output load algebraic estimation for transformerless multilevel active rectifier," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 1877–1889, apr 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/tii.2018.2865445

[22] R. Mayoral Lagunes, J. A. Juárez-Abad, B. A. Aguilar López, J. L. Barahona Ávalos, and J. Linares Flores, "Control de velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes accionado por un inversor trifásico multinivel," *Ingenius*, no. 23, pp. 97–108, dec 2019. [Online]. Available: http://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.09

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.08
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Elaboración de la fibra de cabuya en tejido plano como matriz de refuerzo para la construcción de un retrovisor

Elaboration of the cabuya fiber in flat fabric as reinforcement matrix for the construction of a rear-view mirror

Luis Pruna[1,*], Fabián Velasco[1], Fabián Chachapoya[1], Cristian Paredes[1]

Resumen

Las fibras naturales se han convirtiendo en una excelente alternativa para usos industriales. Esto se debe a su fácil accesibilidad en el mercado y por ser una materia prima renovable. El presente trabajo busca usar la cabuya como material de refuerzo con matriz poliéster para aplicaciones automotrices con bajo costo y peso. Este es el caso de los retrovisores de un vehículo, para el cual se fabricó un molde base. Sobre el molde se realizará el aplicado y moldeado del retrovisor utilizando la fibra de cabuya y una resina poliéster. Las mezclas de octoato de cobalto y peróxido de metil-etilcetona (MEKP) con la fibra natural reducen considerablemente el peso; el costo de manufactura se ve reducido aproximadamente en un 40 % debido a la facilidad de manejo de la fibra y la adquisición de este material. Se recomienda la utilización de la cabuya para aplicaciones automotrices (espejo retrovisor) ya que presenta una reducción considerable en su peso y costo relativamente bajo en comparación con el componente original.

Palabras clave: aplicaciones, fibra natural, extracción, moldeado, proceso.

Abstract

Natural fibers are becoming an efficient alternative for industrial applications. This is due to its easy accessibility in the market and for being a renewable raw material. The present work seeks to replace the cabuya as reinforcement material with polyester matrix for automotive applications with low cost and weight. This is the case of the mirrors of a vehicle, for which a base mold was manufactured. On the mold will be applied and molded the mirror on which the use of the fiber of cabuya and a polyester resin is detached. Mixtures of cobalt octoate and methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) with natural fiber significantly reduce weight; the manufacturing cost is reduced by approximately 40% due to the ease of handling of the fiber and the acquisition of this material. The application of the cabuya is recommended for automotive applications such as the rearview mirror as it presents a considerable reduction in its weight and relatively low cost compared to the original component.

Keywords: Applications, natural fiber, extraction, molding, process.

[1,*]Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: lrpruna@espe.edu.ec. http://orcid.org/0000-0002-0651-9597, http://orcid.org/0000-0003-0609-3853, http://orcid.org/0000-0001-7015-664X, http://orcid.org/0000-0001-5708-5883

Recibido: 21-02-2020, aprobado tras revisión: 03-06-2020

Forma sugerida de citación: Pruna, L.; Velasco, F.; Chachapoya. F. y Paredes, C. (2020). «Elaboración de la fibra de cabuya en tejido plano como matriz de refuerzo para la construcción de un retrovisor». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 81-86. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.08.

1. Introducción

Las fibras naturales son estructuras unidimensionales, largas y delgadas. Se doblan con facilidad y su propósito principal es la creación de tejidos. Su clasificación se basa según su origen vegetal, animal o mineral. A su vez, las fibras de origen vegetal se clasifican de acuerdo con la parte de la planta de la que se extraen [1], esto permite obtener una mejor nomenclatura de las fibras obtenidas con nuevas investigaciones.

La cabuya es una planta muy abundante en la región central del Ecuador, donde es usada por los campesinos para alimentar al ganado vacuno. La fibra se obtiene por medio de un procesamiento por etapas: despenque, machacado, cocción, secado, claseado.

En el Ecuador, el desarrollo de materiales compuestos se encuentra en sus etapas iniciales, por ende, el uso de fibras naturales todavía es limitado. En general, la extracción de fibras vegetales se realiza manualmente, lo que puede cambiar tomando en cuenta el gran potencial que el país ofrece. Resulta importante conocer la producción de fibras naturales nacionales [2].

Por otro lado, la necesidad de materiales más amigables con el medioambiente ha impulsado el estudio de los polímeros naturales para su empleo en aplicaciones desechables a fin de contar con un material disponible en la naturaleza y que, a la vez, sea biodegradable [3].

Estos materiales compuestos representan una importante alternativa para el reemplazo de los compuestos reforzados a base de metal, aluminio, cromo, tungsteno, etc.; sus propiedades resultan en muchas ocasiones comparables e incluso superiores.

La reducción de peso del vehículo se ha considerado como una de las soluciones más importantes para mejorar el ahorro de combustible, la reducción peso-potencia y llegar a tener pocas o nulas emisiones contaminantes. Se cree que el peso del cuerpo del vehículo se puede reducir con el uso de múltiples materiales y sin aumento de costo [4].

De la gran variedad de materiales compuestos que existen en el mercado, se describe que están formados por matrices orgánicas (epoxi, viniléster, poliéster) y fibras de alta resistencia (vidrio, carbono, fibras naturales, etc.), considerándose a estos como los más desarrollados y utilizados a nivel industrial [5].

Con respecto a las fibras, estas son materiales policristalinos o amorfos, tienen diámetros pequeños y poseen gran longitud. Los materiales de las fibras son generalmente polímeros o cerámicos (por ejemplo, aramidas, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio). También se tiene la utilización de fibras naturales como abacá, cabuya y coco, incorporados como elementos de refuerzo en una matriz polimérica. Este tipo de materiales ofrecen muchas ventajas, entre las cuales cabe resaltar la reducción de costo de manufactura y su menor impacto ambiental [6].

Desde siempre en las competencias automovilísticas, los vehículos que participan poseen un peso considerablemente bajo, como es el caso de la Fórmula 1, permitiendo que estos tengan un gran rendimiento, porque usan materiales más ligeros en la elaboración de sus componentes, y con características similares a originales.

En el Ecuador (2008), se produjo aproximadamente 5400 toneladas de fibra de cabuya, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). Las industrias ecuatorianas empezaron a realizar pruebas para conocer la resistencia de esta fibra [6], y con ello sus posibles aplicaciones y el desarrollo de nuevos materiales compuestos biodegradables.

El objetivo de usar fibras naturales en la elaboración de un retrovisor es facilitar que este elemento pueda llegar a ser reciclado, contribuyendo a reducir el impacto ambiental causado por la industria automotriz por el uso de varios materiales en la elaboración de los automóviles, como es el caso de los plásticos, y al mismo tiempo reducir la masa de sus componentes [7], [8].

Se espera la obtención de un retrovisor más ligero, con una considerable resistencia a las deformaciones a causa de impactos, así como una apreciable reducción de su costo de manufacturación, teniendo en cuenta un criterio de sustentabilidad en cada proceso de elaboración; también la posibilidad de introducir la fibra de cabuya en la industria automotriz del país, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones [9–11].

2. Materiales y métodos

2.1. Extracción de la fibra de cabuya

Es necesaria una correcta selección de la planta de cabuya para contar con pencas de mayor tamaño que, a su vez, permitan obtener más fibra con menos plantas, con lo cual mejoramos la eficiencia en la producción. El tiempo aproximado de crecimiento es de 5 años antes de ser despencada utilizando una barra de acero con punta filosa.

Para extraer la penca se deben seguir los siguientes pasos:

1. Cortar con un machete la penca que se halle más cercana al suelo.

2. Picar la planta con la ayuda de la barra en el sitio de la penca cortada (Figura 1), hasta llegar al centro, una vez logrado eso se debe aplicar una fuerza perpendicular sobre la barra para que la planta se abra (es decir, que se levante), así todas las pencas quedan libres.

3. Seguidamente se tiene que quitar con el machete las espinas que tiene cada penca.

4. Con la mano se toma la punta de la penca y la halamos hacia nosotros realizando un movimiento

torsor hasta desprenderla de su centro; esto se conoce como *llagui*.

5. Repetir el paso 4 con todas las pencas.
6. Una vez que se extraen todas se las traslada al área de extracción de la fibra.

Figura 1. Extracción de la fibra

Para obtener la fibra, con la ayuda de un mazo sobre una superficie plana, se procede a machacar las pencas para extraer toda el agua que tienen en su interior. Luego con un machete se quita la capa verdosa que cubre a la penca. Con la ayuda de una tabla de madera se realizan movimientos hacia arriba y hacia abajo de la superficie de la penca para extraer los residuos de agua y la capa protectora, hasta obtener la fibra deseada, que puede presentar un color blanco verdoso en ciertas zonas, ver la Figura 2.

Figura 2. Fibra en bruto

Una vez que se tiene la fibra se procede a su cocción por unos 100 minutos; la misma adquiere un color blanco intenso. Se la pone a secar por cuatro días en un alambre, con la ayuda de pinzas se la fija. Es importante que la fibra no se moje al estar colgada porque puede perjudicarse su calidad (Figura 3). Cuando la fibra está completamente seca presenta un color amarillo pálido; se continúa con su peinado (claseado) utilizando una tabla con clavos para separar las fibras más pequeñas, dando como resultado una fibra uniforme, lista para usar.

Figura 3. Cocinado y secado de la fibra

2.2. Tejido de la fibra de cabuya

Para ello se usa un tablero cuadriculado de madera, para tener la máxima precisión en la colocación de las hebras de la fibra. El tejido usado para este caso fue un tramado a 90 grados: se coloca la fibra de cabuya en forma horizontal a cada 2 mm de espaciado y en lo que se refiere a la parte vertical se realiza a cada 10 mm de espaciado; cada uno de los conjuntos de hebras colocadas debe tener un total de 4 hebras (Figura 4). El tejido final tiene 40 cm de ancho x 30 cm de alto.

Figura 4. Tejido de la fibra

Se procede a amarrar los extremos de cada grupo de hebras para que el tejido no tienda a deformarse en la posterior manipulación.

2.3. Proceso de fabricación del retrovisor

Para la fabricación del retrovisor se sigue el siguiente proceso:

1. Almacenamiento de la resina y fibra correspondiente.
2. Preparación de la fibra.
3. Preparación del molde.

4. Preparación de la mezcla.
5. Colocación de la matriz (cabuya).
6. Solidificación.
7. Desmoldar.
8. Lijado.
9. Inspección de acabado.
10. Verificación de pesos.

Al retrovisor original se le hace una limpieza integral, luego viene el despiece del espejo así como de los demás accesorios (Figura 5).

Figura 5. Limpieza de impurezas del retrovisor original

Figura 6. Aplicación de la cera desmoldante

Cuando se tiene el molde limpio de impurezas se procede a la colocación de la cera desmoldante tal y como se muestra en la Figura 6, con la finalidad que se pueda retirar el retrovisor al finalizar el secado.

Como matriz se utiliza la fibra de cabuya; para el curado de la resina el octoato de cobalto y el peróxido de metil–etilcetona (MEKP) o catalizador, como refuerzo se trabaja con dos capas de fibra de cabuya (Figura 7).

Figura 7. Fibra de cabuya elaborada y tejida a mano

Las proporciones de la resina, del octoato de cobalto y del catalizador deben ser exactas, pues deben cumplir con la composición marcada en la Tabla 1. Para la aplicación de la mezcla se emplea una brocha teniendo cuidado de hacerlo de forma uniforme para evitar la acumulación en ciertas áreas.

Tabla 1. Cantidades de resina, octoato de cobalto, MEKP y fibra de cabuya, utilizadas para el material compuesto del retrovisor

Descripción	Cantidad
Espesor [mm]	2,5
Número de capas de resina	2
Fibra de cabuya tejida [g]	25
Resina poliéster [ml]	150
Octoato de cobalto [ml]	0,75
MEKP [ml]	0,4

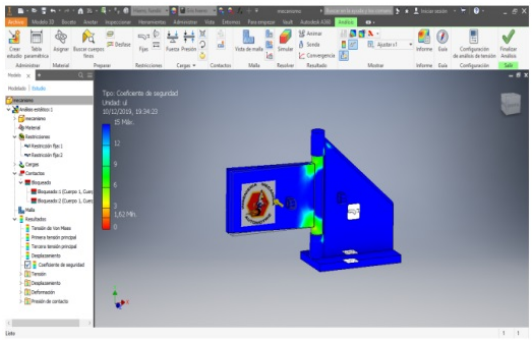
En la tabla anterior se especifican los parámetros con los cuales se va a hacer el retrovisor, así como la cantidad de los reactivos químicos necesarios para una mayor velocidad de secado de la resina. Se deja secar cada parte del retrovisor por tres días para conseguir una mejor consistencia y dureza. Cumpliendo con estas recomendaciones se obtuvo un retrovisor con mejores características de resistencia y una considerable reducción de peso (Figura 8).

Figura 8. Retrovisor con una matriz de fibra de cabuya

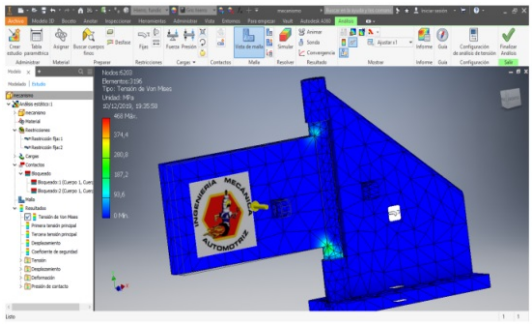
2.4. Diseño del mecanismo para el giro en 180°

Para el mecanismo se toma como base una bisagra que se abre y cierra continuamente como la que usamos en la puerta de nuestros hogares, porque el retrovisor debe mantener su posición inicial y recuperarse una vez que soporte un impacto y haya sido movido un cierto grado desde su origen. Para esto se decide colocar a los lados del retrovisor unos resortes de las mismas características, con esto se consigue que si se mueve el retrovisor a un lado uno de los resortes se comprime y el otro se extiende y una vez que se deje de aplicar la fuerza, se regresa al estado inicial.

El modelado del mecanismo se lo realiza en Autodesk Inventor (Figura 9); se deben analizar los principales puntos sobre los cuales se va a ejercer un mayor esfuerzo al aplicar una fuerza sobre el mecanismo. Con esta información se toman las precauciones necesarias en su elaboración para evitar posibles fallas durante su funcionamiento (quizás sea necesario reforzar ciertas zonas).



(a)



(b)

Figura 9. Análisis del mecanismo en Autodesk Inventor. a) Coeficiente de seguridad. b) Tensión de Van Mises

En la Figura 10 se observan los resultados del análisis del retrovisor, el mismo que debe cumplir lo dispuesto en la Norma NTE INEN 1323.

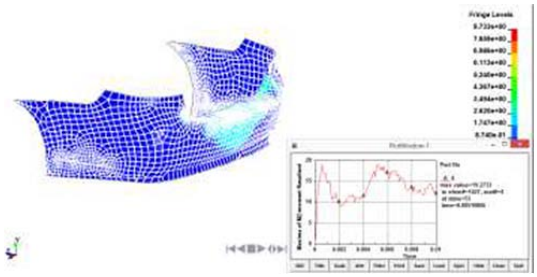


Figura 10. Análisis del retrovisor usando el *software* Ansys

3. Resultados y discusión

En la Tabla 2 se resumen las comparaciones de pesos obtenidos al aplicar la fibra de cabuya en la realización del retrovisor, lo cual se puede traducir como un total éxito dado que las mediciones obtenidas nos muestran una reducción considerable de su peso, con lo cual se ayuda a la reducción de peso de los automóviles.

Tabla 2. Comprobación de los pesos

Descripción	Peso (kg)
Con la fibra de cabuya con el mecanismo	0,223
Con la fibra de cabuya sin el mecanismo	0,1859
Retrovisor original	0,227

En la Tabla 3 se plasma el comportamiento que llegó a tener el retrovisor de fibra de cabuya a la aplicación de una fuerza en su superficie, con lo cual se verificó la resistencia del mecanismo de giro de 180°; se observó que los soportes de los resortes de recuperación deben ser reforzados para evitar la fractura de estos pequeños alojamientos del resorte; de igual forma se pudo visualizar que al aplicar una mayor fuerza sobre la superficie del retrovisor esta tiende a descascararse en una pequeña zona; el área total del retrovisor es aproximadamente de 150 mm^2 en la cual se va a realizar el análisis de resistencia.

Tabla 3. Resistencia al impacto

	Fuerza/área (MPa)	Fuerza (N)
Primera prueba	0,039	5,86
Segunda prueba	0,019	2,9
Tercera prueba	0,01	1,45

Luego de realizar el análisis de cada una de las pruebas, se puede determinar que la fibra de cabuya y todas las fibras naturales presentan una baja resistencia mecánica, por tal motivo el accesorio que se desee construir no debe estar sometido a cargas excesivas.

La fibra de cabuya tiene una apariencia flexible, su manipulación es sencilla y no se fractura con facilidad. En cambio, otras fibras son bastante frágiles, se rompen con facilidad y son rígidas, lo cual dificulta su manipulación. En el caso del bagazo de caña la longitud de sus fibras es menor que las de los otros especímenes, lo cual hace más compleja su aplicación en la industria automotriz; además, estas fibras presentan residuos adheridos que son los conductos en donde se almacena la sacarosa, generando que estas sean de estructura menos homogénea.

4. Conclusiones

La mezcla de octoato de cobalto y peróxido de metil–etilcetona (MEKP) con la fibra natural de cabuya tiende a reducir considerablemente el peso del retrovisor y aumentar su dureza en relación con el de fabricación tradicional.

El costo de manufactura se reduce al realizarlo con esta fibra, casi en un 40 %.

Debido a la facilidad de manejo de la fibra y la adquisición de materiales a utilizar la estratificación manual es uno de los procesos más empleados para la elaboración de equipos en la industria automotriz.

La selección del material o de la fibra natural a utilizar dependerá de los requerimientos propios de la aplicación a realizar.

Los resultados son alentadores para tratar de impulsar el uso de las fibras naturales nacionales en el desarrollo de otros elementos (piezas) automotrices, ayudando al cuidado del ambiente al obtener productos biodegradables.

Referencias

[1] S. M. Velásquez Restrepo, G. J. Pelaéz Arroyave, and D. H. Giraldo Vásquez, "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos," *Informador Técnico*, vol. 80, no. 1, pp. 77–86, jun. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.23850/22565035.324

[2] D. J. Moreano Moreano and D. A. Zambrano Romero, "Diseño y construcción de parachoques delantero y posterior de un vehículo chevrolet optra año 2008 a partir de fibra natural de la planta de abacá," 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/2BuYpid

[3] O. A. Jiménez Arévalo, M. A. Sánchez-Soto, and M. Trujillo Barragán, "Impacto de baja energía en un compuesto almidón-fibra natural," in *XV Congreso Internacional anual de la SOMIM Sonora. México*, 2009, pp. 690–695. [Online]. Available: https://bit.ly/3eMDPrO

[4] H. Iza, L. Quiroz, and F. Salazar, "Aplicación de fibra de yute en la construcción de carrocerías para vehículos fórmula SAE," *Revista: Energía y Mecánica, Innovación y Futuro*, vol. 1, no. 4, pp. 102–111, 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/36YdiFx

[5] A. Morales, D. Valenzuela, T. Lozano, and M. Ponce, "Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén," *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 12, no. 5, pp. 255–267, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/2Y1sayy

[6] V. Guerrero, J. Dávila, S. Galeas, P. Pontón, N. Rosas, V. Sotomayor, and D. Valdivieso, *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales.* Imprefep, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/3gU6Tjg

[7] S. Aguilar, J. Ramírez, and O. Malagón, "Extracción de fibras no leñosas Cabuya (*Furcraea andina Trel.*) y banano (*Musa Paradisiaca L.*) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa y papel," *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 8, no. 2, pp. 89–98, 2007. [Online]. Available: https://bit.ly/2XW6LHh

[8] H. G. Villacís Salazar, "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de vidrio y abacá mediante estratificación," 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/306jQjF

[9] S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur, *Cellulose Fibers: Bio–and Nano–Polymer Composites.* Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7

[10] F. R. Delgado Arcentales, S. G. Galeas Hurtado, and V. H. Guerrero Barragán, "Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y de vidrio para la elaboración de tableros," *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, 2014. [Online]. Available: https://bit.ly/3gMfO66

[11] A. Mohanty, M. Misra, and L. Drzal, *Natural fibers, biopolimers and biocomposites.* CRC Press, 2005. [Online]. Available: https://bit.ly/3gPyzpk

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.09
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos

Monitoring Network to Automate the Cooling System of a Data Center

José Ignacio Vega-Luna[1,*], Francisco Javier Sánchez-Rangel[1], Gerardo Salgado-Guzmán[1], José Francisco Cosme-Aceves[1], Víctor Noé Tapia-Vargas[1], Mario Alberto Lagos-Acosta[1]

Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una red de monitorización de temperatura, humedad y calidad del aire en un centro de datos para la automatización del encendido y apagado del sistema de enfriamiento, ventilación y filtrado de aire usando Internet de las cosas (IoT-Internet of Things). Se puso en marcha una red con tecnología inalámbrica de largo alcance compuesta por cinco nodos esclavo, un nodo maestro y una interfaz de usuario. Los nodos esclavo transmiten periódicamente al nodo maestro el valor de las tres variables de ambiente. El nodo maestro envía la información recibida de los esclavos a un servidor en la nube para poder ser accedida desde una interfaz de usuario. Cuando el valor de alguna de las variables alcanza el umbral configurado se enciende el sistema de enfriamiento, ventilación y/o filtrado de aire, según sea el caso. Las pruebas mostraron que se logró una precisión menor a ±1.0 °C en la medida de temperatura, menor a ±2 % en la medida de humedad, menor a ±8 μg/m^3 en la medida de la calidad del aire y un alcance de 11.5 kilómetros con línea de vista en la transmisión de datos en la red. Según estos resultados, la red puede ponerse en funcionamiento para la monitorización de sensores y procesos en otras instalaciones con este alcance.

Palabras clave: automatización, centro de datos, inalámbrica, IoT, monitorización, temperatura

Abstract

The objective of this work was to develop a monitoring network of temperature, humidity and air quality in a data center to automate the on and off switching of the cooling, ventilation and air filtering system using IoT (Internet of Things). A network with long-range wireless technology was implemented, consisting of five slave nodes, a master node and a user interface. The slave nodes periodically transmit the value of the three environment variables to the master node. The master node sends the information received from the slaves to a cloud server, so that it can be accessed from a user interface. When the value of any of the variables reaches the configured threshold, the cooling, ventilation and/or filtering system is activated as required. The tests showed that an accuracy of less than ±1.0 °C was obtained in the measurement of temperature, less than ±2 % in the measurement of humidity, less than ±8 μg/m^3 in the measurement of air quality and a range of 11.5 kilometers with line of sight was achieved in data transmission over the network. Based on these results, the network can be implemented to monitor sensors and processes in other facilities with this scope.

Keywords: Automation, data center, IoT, monitoring, temperature, wireless.

[1,*] Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México. Autor para correspondencia ✉: vlji@azc.uam.mx.
http://orcid.org/0000-0002-4226-2936, http://orcid.org/0000-0002-4182-5856,
http://orcid.org/0000-0002-0581-7410, http://orcid.org/0000-0002-6875-5683,
http://orcid.org/0000-0002-1160-2432, http://orcid.org/0000-0003-0455-007X.

Recibido: 25-04-2020, aprobado tras revisión: 11-06-2020

Forma sugerida de citación: Vega-Luna, J. I.; Sánchez-Rangel, F. J.; Salgado-Guzmán, G.; Cosme-Aceves, J. F.; Tapia-Vargas, V. N. y Lagos-Acosta, M. A. (2020). «Red de monitorización para automatizar el sistema de enfriamiento de un centro de datos». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 87-96. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.09.

1. Introducción

El enfriamiento, ventilación y filtrado de aire son los tres sistemas críticos en la operación de un centro de datos o centro de procesamiento de datos (CPD). El aumento en la temperatura en el ambiente puede causar que los equipos alojados en el CPD se detengan, se apaguen automáticamente o inclusive sufran daños. El funcionamiento del CPD debe garantizar el acceso y disponibilidad del equipo de cómputo y telecomunicaciones a clientes y usuarios ya que de esto depende la productividad de empresas e instituciones [1]. Es decir, si las aplicaciones no se encuentran operando, los clientes y usuarios no podrán realizar su trabajo.

Hoy en día, en la mayoría de los CPD, la monitorización de variables ambientales se realiza de manera local. Una computadora instalada en la oficina de control del CPD recibe la información de los sensores, usando comúnmente un segmento Ethernet o tecnología alambrada 2-Wire y la muestra en una interfaz de usuario [2, 3]. Esto presenta las siguientes desventajas: 1) No se cubre toda la superficie del CPD ya que los sensores se encuentran instalados en lugares específicos; debido a la limitación en el alcance de la tecnología de comunicaciones usada no es posible acceder desde la oficina de control algunos puntos. 2) Si por alguna razón o contingencia el valor de alguna variable alcanza el umbral y permanece en él durante un tiempo prolongado, la única forma mediante la cual el administrador del CPD puede saberlo es visualizándolo en la interfaz de usuario. No existe un mecanismo que permita al administrador reaccionar oportunamente ante la eventualidad cuando no se encuentre en la oficina de control. 3) Para realizar la monitorización como lo exigen hoy las auditorías, deben llevarse a cabo cambios importantes en la interfaz de usuario para ser invocada desde la Internet [4].

Este trabajo fue realizado a petición de un centro de datos. Se solicitó poner en marcha una red inalámbrica de monitorización de sensores. La red debe estar compuesta por cinco nodos esclavo, instalados estratégicamente en el CPD, encargados de medir periódicamente el valor de temperatura, humedad y concentración de partículas PM2.5 y transmitirlo a un nodo maestro.

Las funciones del nodo maestro deben ser: A) Enviar a un servidor en la nube la información recibida desde los nodos esclavo. B) Implantar la interfaz de usuario mediante un servidor web cuya página permita visualizar en línea el valor de las tres variables de ambiente. C) En caso de que el valor de una de las variables alcance el umbral configurado activar el sistema de enfriamiento, ventilación o filtrado de aire según sea el caso. D) Si el valor de una variable es igual o mayor al umbral durante un tiempo establecido, se deberá enviar un mensaje de alerta de WhatsApp a un teléfono móvil. E) El sistema de control debe ser del tipo ON/OFF.

La implantación de la red no debe necesitar cableado adicional ni modificar el existente del CPD. La distancia del nodo esclavo más lejano al nodo maestro es de 300 metros.

La monitorización periódica de las variables desde la Internet es porque así lo requieren las empresas e instituciones que auditan y certifican los sistemas de seguridad y mantenimiento de los centros de datos [5], [6].

Con los últimos avances tecnológicos ha surgido una variedad de tecnologías de comunicación de radiofrecuencia de gran cobertura geográfica, bajo costo y bajo consumo de energía; algunas de ellas fueron candidatas a usarse en el desarrollo de este trabajo [7]. Algunas de estas tecnologías son wifi, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee y LoRa (Long Range) [8].

Las características principales de las cuatro tecnologías inalámbricas anteriores se exponen a continuación.

La tecnología wifi usa transceptores de bajo costo, alcance limitado de 15 a 25 metros con línea de vista, proporciona gran ancho de banda y consume relativamente una cantidad alta de energía eléctrica [9].

La tecnología BLE tiene alcance de 100 metros nominalmente con línea de vista, proporciona una cantidad mediana de ancho de banda y es de bajo consumo de energía [10, 11].

En cuanto a los transceptores ZigBee, estos dispositivos son de bajo costo, tienen alcance de 100 metros, consumen una cantidad baja de energía y presentan ancho de banda bajo [12].

Por otra parte, la tecnología LoRa usa transceptores de bajo costo, proporciona un alcance de varios kilómetros con línea de vista, tiene un ancho de banda pequeño y es de bajo consumo de energía [13].

Considerando las características indicadas anteriormente, se optó por utilizar la tecnología LoRa y desarrollar una red de área amplia de bajo consumo de energía (LPWAN-Low Power Wide Area Network) [14]. LoRa es un protocolo abierto desarrollado por la LoRa Alliance que permite crear redes LPWAN para el mercado de Internet de las cosas (IoT-Internet Of Things) [15]. El protocolo LoRa define la capa física del modelo OSI o modulación inalámbrica para llevar a cabo la comunicación de larga distancia, usando transceptores de radio de baja potencia que transmiten pequeñas cantidades de información a baja velocidad, logrando mayor tiempo de vida de baterías [16].

Además de los avances tecnológicos en comunicaciones inalámbricas, la aparición de sensores, actuadores, microcontroladores y proveedores de servicios en la Internet, han impulsado fuertemente el desarrollo de aplicaciones de IoT. El crecimiento de los centros de datos ha sido estimulado por las tendencias de la IoT, *Big Data*, comercio electrónico y el uso de la nube [17].

La red de monitorización desarrollada en este trabajo consiste de una LPWAN compuesta por seis nodos, cinco como esclavos y un maestro. Los nodos se im-

plantaron usando la tarjeta Huzzah32-ESP32, la cual fue seleccionada porque se puede programar usando bibliotecas de funciones de código abierto y libre uso disponibles en la nube, lo que facilitó el desarrollo de la programación al no usar un lenguaje complejo de bajo nivel.

Las investigaciones recientes del uso de la tecnología LoRa, donde se requiere largo alcance, han tenido como resultado avances importantes en diferentes ámbitos de la vida humana y monitorización de procesos. Se han realizado, por ejemplo, aplicaciones de esta tecnología en ciudades [18], hogares [19] y edificios inteligentes [20], granjas y campos de cultivo [21], cuidado de la salud [22] y hospitales, procesos industriales [23], consumo de energía eléctrica [24] y agua [25], control de sistemas de calefacción [26], seguridad [27], fluidos [28] y localización [29], entre otras.

De manera paralela, durante los años recientes se ha creado una cantidad grande de redes de sensores para monitorización remota de parámetros ambientales, principalmente de temperatura, usando IoT. Algunas de ellas se han usado en aplicaciones de meteorología [30], edificios inteligentes [31, 32], sistemas de salud [33], agricultura [34], plantas industriales, termoeléctricas [35] y producción de acero [36].

De forma similar, se ha llevado a cabo un número importante de aplicaciones con redes de sensores inalámbricos en centros de datos a través de IoT [37]. La mayoría de ellas se ha concentrado en la monitorización y operación de sistemas de enfriamiento para hacer eficiente o reducir el consumo de energía eléctrica [38] y agua [39].

Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente, los beneficios y aportaciones de los autores con la aplicación desarrollada son los siguientes: 1) El monitoreo de las variables se realiza de manera remota usando plataformas de IoT en la nube de reciente creación que proporcionan servicios eficientes, confiables y siempre disponibles para almacenamiento de información y envío de mensajes de alerta a un teléfono móvil. Esta tarea en la mayoría de los centros de datos se realiza localmente y están migrando el monitoreo a una solución como la creada en este trabajo. 2) Permite realizar acciones oportunamente antes de presentarse alguna contingencia en el centro de datos. 3) Resuelve una necesidad real del centro de datos. 4) La instalación de la red no es intrusiva, ya que usa comunicación inalámbrica y no modifica el cableado del centro de datos. 5) Está basada en programación hecha en bibliotecas de funciones de libre uso y código abierto, lo cual reduce el tiempo y complejidad de su instalación.

En las siguientes secciones de este documento se indican el diseño, implantación y estructura de la red de monitorización, se explican las pruebas llevadas a cabo, así como el objetivo de estas y resultados logrados y, finalmente, se indican las conclusiones obtenidas y principales recomendaciones.

2. Materiales y métodos

2.1. Extracción de la fibra de cabuya

La red de monitorización está integrada por tres elementos: los nodos esclavo, el nodo maestro y la interfaz de usuario. En la Figura 1 se indica el diagrama funcional de la red de monitorización.

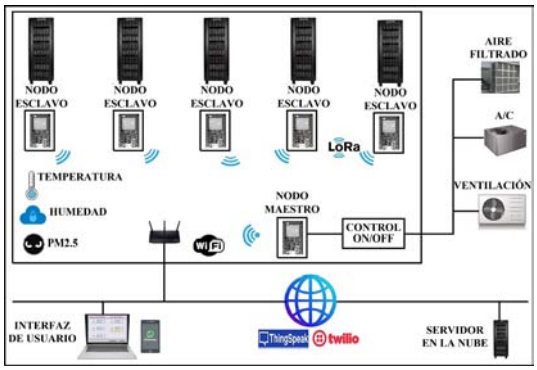


Figura 1. Diagrama funcional de la red de monitorización.

2.2. Los nodos esclavo

Los cinco nodos esclavo se implantaron usando la arquitectura mostrada en la Figura 2.

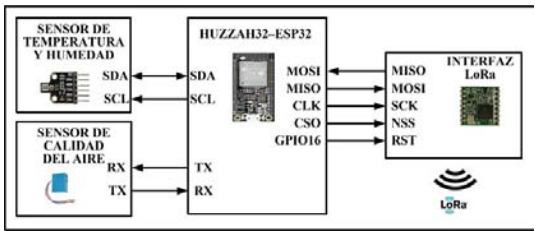


Figura 2. Arquitectura de los nodos esclavo.

Los componentes usados en cada uno de estos nodos fueron la tarjeta Huzzah32-ESP32, el sensor de temperatura y humedad, el sensor de calidad del aire y el transceptor LoRa. La tecnología LoRa usa las funciones de la capa física, la capa 1 del modelo OSI, ya que determina el tipo de modulación, ancho de banda y la frecuencia de la señal usada en la red.

Se utilizó la tarjeta Huzzah32-ESP32 la cual cuenta con los recursos requeridos en el diseño de los nodos esclavo, reduciendo de esta forma el tamaño y costo de los mismos. Microcontrolador Tensilica LX6 de dos núcleos a 240 MHz, memoria *flash* de 4 MB, memoria RAM de 520 KB, interfaces wifi 802.11b/g/n, Bluetooth clásico y LE con antena integrada, 3 puertos UART, 3 puertos SPI, 2 puertos I^2C, 25 entradas/salidas de propósito general (GPIO-General Purpose Input/Output) y un cargador para batería de ion de litio son los principales recursos de la tarjeta.

El sensor de temperatura y humedad utilizado en los nodos esclavo fue el dispositivo BME680. Este es

un dispositivo digital que integra en un empaquetado metálico compacto de 3.0 × 3.0 mm^2 cuatro sensores: temperatura, humedad relativa, presión barométrica y gas. Se alimenta con 3.3 o 5 V ya que la tarjeta en la que se encuentra montado cuenta con un regulador de voltaje. Se usa en aplicaciones de automatización en hogares, oficinas, industrias, IoT, pronóstico del tiempo, medida de calidad del aire y navegación en interiores, entre otras. Cuenta con interfaces digitales I^2C y SPI. El rango de operación es de –40 a +85 °C y de 0 a 100 % de humedad relativa (RH). Puede medir temperatura con una precisión de ±1.0 °C y humedad con una exactitud de ±3 %.

En los nodos esclavo, la comunicación entre el BME680 y el microcontrolador de la tarjeta Huzzah32 se realizó a través de los puertos I^2C. El BME680 trabaja como esclavo usando la dirección 0 × 77 del bus I^2C para proporcionar el valor de la temperatura con una resolución de 20 bits y el de la humedad con 16 bits. Los sensores de presión barométrica y gas del sensor BME680 se deshabilitaron para solo consumir una corriente de 2.1 µA y medir únicamente temperatura y humedad.

Para la medida de la calidad del aire en los nodos esclavo se usó el sensor PMS5003. Este dispositivo mide la cantidad de partículas suspendidas en el aire, esto es, la concentración de partículas resultado de la operación de vehículos de combustión interna, por fuego generado por quema de madera o por procesos industriales. Puede medir partículas en el ambiente de 1, 2.5 y 10 micrones de diámetro, denominadas PM1.0, PM2.5 y PM10, respectivamente. Su funcionamiento se basa en la dispersión de luz láser irradiando las partículas suspendidas en el aire para capturar la luz láser dispersa y obtener la medida de la cantidad de partículas por unidad de volumen utilizando un procesador. El sensor PMS5003 cuenta con un puerto serie UART para transmitir la medida de partículas cada segundo en forma digital. Consume menos de 100 mA en estado activo y menos de 200 µA en modo pasivo. Opera en el rango de temperatura de –10 a +60 °C y en el rango de humedad de 0 a 99 % RH, haciéndolo un buen candidato a usar en las condiciones ambientales de un centro de datos. En los nodos esclavo, este sensor se conectó a un puerto UART de la tarjeta Huzzah32 el cual se configuró para trabajar a una velocidad de 9,600 bps y medir partículas PM2.5.

El transceptor LoRa utilizado en los nodos esclavo es el circuito RFM95. Este dispositivo cuenta con una interfaz SPI y sus características principales de operación son las siguientes: alimentación de 3.3 V, potencia de salida de +5 a +20 dBm hasta 100 mW, consumo de corriente 100 mA durante la transmisión y 30 mA durante la escucha activa, alcance 2 km con línea de vista con antenas unidireccionales sintonizadas o hasta 20 km usando antenas direccionales, velocidad de transmisión RF de 0.018 a 37.5 Kbps y velocidad de transmisión del SPI de hasta 300 Kbps. El transceptor RFM95 puede configurarse para ser controlado desde un *host* externo por medio del puerto SPI. El *host* instrumenta la interfaz de comunicación entre ambos dispositivos usando un protocolo maestro/esclavo. En este trabajo el *host* externo es el controlador de la tarjeta Huzzah32 que realiza las funciones de maestro y el transceptor RFM95, las de esclavo. La interfaz tiene dos tipos de mensajes: paquetes de comando y paquetes de respuesta. El maestro siempre envía paquetes de comando, mientras que el esclavo siempre transmite paquetes de respuesta. Cuando el maestro envía un paquete debe esperar que el esclavo envíe un paquete de respuesta antes de transmitir otro paquete de comando. El transceptor RFM95 es un esclavo y no puede iniciar una transacción con el maestro. Los paquetes de comando consisten de los siguientes campos: preámbulo (4 bytes), inicio de trama (1 byte), tipo de comando (1 byte), número de mensaje (1 byte), longitud del mensaje (2 bytes), mensaje (hasta 256 bytes) y *checksum* para verificar la integridad del paquete (2 bytes). En los nodos esclavo el puerto SPI del transceptor RFM95 se conectó al puerto SPI de la tarjeta Huzzah32. Para lograr el alcance requerido de la red, el transceptor RFM95 de los nodos usa una antena exterior de ganancia tipo Omni Lora de 915 MHz, con estas características: ganancia 8 dBi, conector tipo N hembra, impedancia 50 ohms y longitud 1,145 mm.

En cuanto a la programación de la tarjeta Huzzah32 de los nodos esclavo, esta se realizó usando el ambiente de desarrollo de Arduino IDE. La programación se encarga de ejecutar tareas como configurar las terminales GPIO y los puertos I2C, UART y SPI e inicializar el transceptor RFM95. Posteriormente, realizar la lectura, cada 60 segundos, de la temperatura (T), humedad relativa y concentración de partículas (PM2.5) para transmitirla, a través del transceptor LoRa, al nodo maestro.

Para llevar a cabo las tareas anteriores se utilizaron las bibliotecas de código abierto: Adafruit_BME680.h para comunicar la tarjeta Huzzah32 con el sensor de temperatura y humedad; software Serial.h para comunicar la tarjeta con el sensor de calidad del aire y RH_RF95.h y SPI.h para la transmisión de información al nodo maestro por medio del transceptor LoRa y el puerto SPI, respectivamente.

2.3. El nodo maestro

De manera similar que en los nodos esclavo, el nodo maestro se desarrolló usando la tarjeta Huzzah32-ESP32 y el transceptor LoRa RFM95. Adicionalmente, el nodo maestro integra una interfaz eléctrica entre la tarjeta Huzzah32 y los actuadores del equipo de filtrado de aire, ventilación y enfriamiento, como se muestra en el diagrama de bloques de la arquitectura del nodo en la Figura 3.

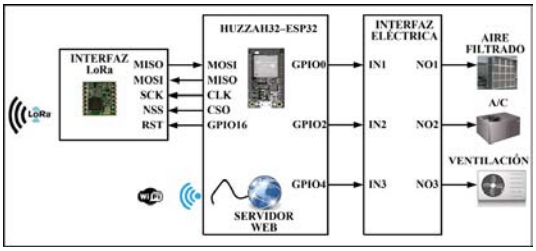


Figura 3. Arquitectura del nodo maestro.

Las funciones del nodo maestro se definieron programando la tarjeta Huzzah32 para que realice la configuración de las terminales GPIO y del puerto SPI e inicialice el transceptor RFM95 y la interfaz wifi. A continuación, invoca la función que arranca el servidor web, la cual puede ser interrumpida al recibir, por medio del puerto SPI, la información transmitida por los nodos esclavo.

La rutina de servicio de la interrupción se encarga de leer la información del puerto SPI y transmitirla al servidor en la nube. Si la medida de alguno de los parámetros ambientales, T, RH o PM2.5, alcanza el umbral configurado activa el actuador del equipo correspondiente. Para el caso de la temperatura se enciende el equipo de enfriamiento o aire acondicionado (AC); cuando la humedad llega al máximo se enciende el mecanismo de filtrado de aire y cuando la concentración de partículas es igual o mayor a 2.5 micras se enciende el equipo de ventilación. En caso de que el valor de uno o más de los parámetros anteriores sea igual o mayor al umbral durante un tiempo configurado, esta rutina trasmite el mensaje de alerta de WhatsApp al teléfono móvil a través de la plataforma de servicios Twilio. Cuando el valor retorna al valor menor al umbral apaga el equipo y trasmite el mensaje correspondiente de WhatsApp.

Además de las bibliotecas de funciones de código abierto usadas en los nodos esclavo, en la programación del nodo maestro se emplearon las bibliotecas siguientes: WiFi.h para realizar la comunicación con la interfaz wifi y WebServer.h para implantar el servidor web. En la Figura 4 se indica el diagrama de flujo usado para desarrollar la programación del nodo maestro. El servidor en la nube utilizado está disponible a través del proveedor de servicios de Internet ThinkSpeak.

La interfaz eléctrica entre la tarjeta Huzzah32 y los equipos de A/C, filtrado de aire y ventilación se puso en funcionamiento usando un módulo de cuatro canales de 3 V/125 VAC-250 VAC. Este módulo integra cuatro relevadores SRD-03VDC-SL-C de un polo dos tiros y un opto-acoplador en cada relevador para aislar el circuito digital, en este caso la tarjeta Huzzah32, del sector de potencia. Los relevadores del módulo se alimentan con 3 V, la entrada IN de cada uno de ellos se activa desde una terminal GPIO de la tarjeta Huzzah32, configurada como salida, para encender los equipos del centro de datos. Los actuadores de los equipos están conectados a la salida normalmente abierta (NO) del relevador correspondiente como se indica en la Figura 5.

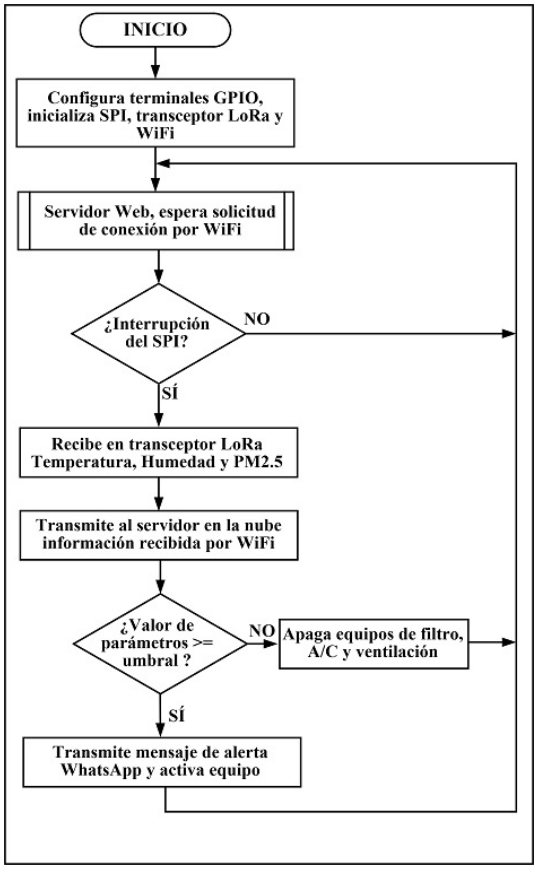


Figura 4. Diagrama de flujo de la programación del nodo maestro.

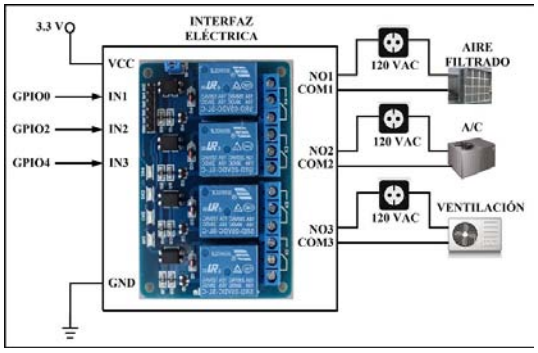


Figura 5. Interfaz eléctrica del nodo maestro.

2.4. La interfaz de usuario

La interfaz de usuario es una página creada con HTML mostrada cuando se realiza la conexión al servidor web. En la Figura 6 se ve la página principal de la interfaz de usuario a través de la cual se visualiza en línea el valor de la medida de temperatura, humedad relativa

y concentración de PM2.5 transmitida por cada nodo esclavo.

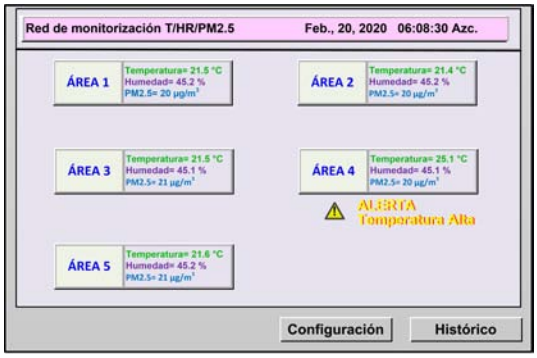


Figura 6. Interfaz de usuario.

Para cada nodo esclavo existe un botón en la interfaz bajo el cual se indica una señal de alerta cuando el valor de alguno de los parámetros alcance el umbral. Al presionar el botón de un nodo esclavo, la interfaz de usuario muestra la gráfica en el tiempo del valor de los parámetros obtenida desde ThinkSpeak como se indica en la Figura 7.

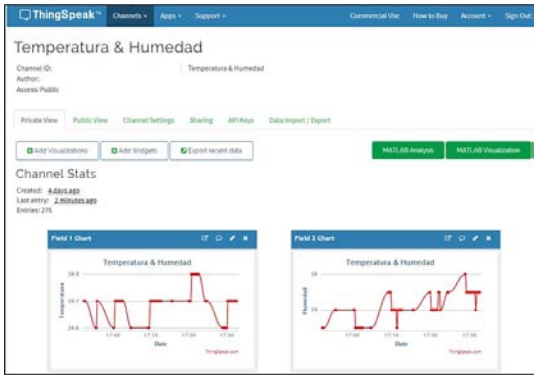


Figura 7. Gráficas de temperatura y humedad en ThinkSpeak.

La interfaz cuenta adicionalmente con dos botones: el de Configuración, el cual permite establecer el número del teléfono móvil y valores de umbral de T, RH y PM2.5, y el de Histórico, con el cual se puede descargar, desde ThinkSpeak, los valores históricos de los parámetros medidos durante un período de tiempo seleccionado y almacenarlos en un archivo de texto. Este archivo es el que generalmente solicitan las auditorías a los centros de datos.

3. Resultados y discusión

Se realizaron tres grupos de pruebas. El primer grupo tuvo como objetivo determinar la precisión de la temperatura medida por la red de monitorización. Para llevar a cabo estas pruebas, se estableció artificialmente, con un calentador, la temperatura en el sensor de un nodo esclavo con diferentes valores. A continuación, se midió la temperatura en torno al nodo esclavo con un termómetro analógico, similar al usado en las auditorías, utilizado como referencia, y se comparó con el valor reportado en la interfaz de usuario. El fabricante del sensor BME680 indica una precisión nominal en la medida de temperatura de ±1.0 °C [40]. Los resultados de estas pruebas mostraron que la precisión real es menor a ±1.0 °C la cual se mantuvo hasta los 68 ºC. Después de este valor, al aumentar la temperatura, la diferencia entre el valor indicado en el termómetro respecto al reportado en la interfaz aumentó proporcionalmente como se muestra en la gráfica de la Figura 8.

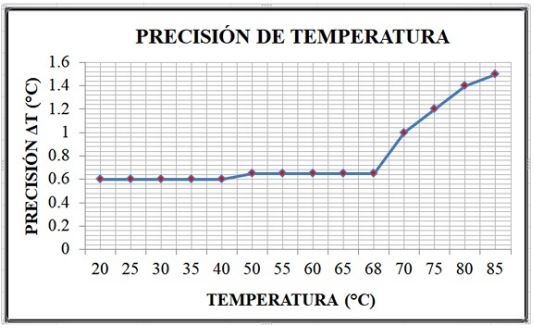


Figura 8. Precisión de la medida de temperatura.

Durante las pruebas anteriores no se presentaron problemas en la comunicación entre los nodos de la red. La distancia entre el nodo esclavo más lejano y el nodo maestro son 300 metros. Sin embargo, se realizó el segundo grupo de pruebas para determinar el alcance de la red.

La señal transmitida por los nodos sufre interferencia y es difractada o absorbida en el medio, el alcance de esta depende del valor de potencia establecida en el transceptor LoRa, factores ambientales y obstáculos en la ruta de señal. Las pruebas anteriores se realizaron bajo las siguientes condiciones: con línea de vista entre los nodos, el valor de potencia de transmisión RF configurado en el transceptor RFM95 fue 20 dBm-100 mW, frecuencia de RF 915 MHz, ancho de banda BW 125 KHz y la temperatura y humedad relativa del ambiente 21.5 °C y 45.1 %, respectivamente.

En la realización del segundo conjunto de pruebas se ubicó un nodo esclavo a diferentes distancias del nodo maestro con línea de vista. En cada ubicación se verificaron las medidas reportadas en la interfaz de usuario. Los resultados de estas pruebas indicaron que el alcance de la red es 11.5 kilómetros con línea de vista. A distancias mayores se perdió el enlace entre el nodo esclavo y el nodo maestro. En este grupo de pruebas se realizó y se ejecutó un programa en el nodo maestro para mostrar el valor del indicador de potencia de la señal recibida (RSSI-Received Signal Strength Indication) en el IDE de Arduino. Los resultados indicaron que la atenuación del valor de RSSI disminuye con-

siderablemente después de 9.2 kilómetros y continúa haciéndolo constantemente hasta que la comunicación se pierde a 11.5 kilómetros, como se indica en la gráfica de la Figura 9. En caso de usar esta red en un lugar con diferentes condiciones ambientales, es recomendable realizar estas pruebas para determinar las limitaciones en el alcance.

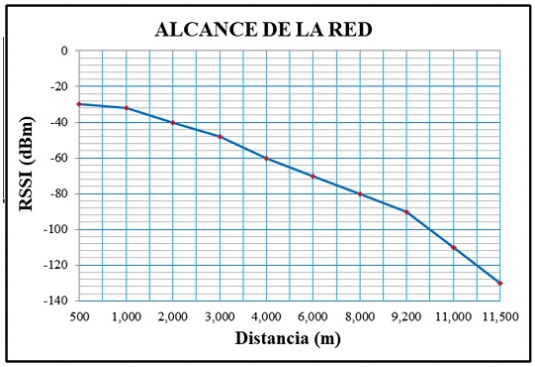


Figura 9. Alcance de la red.

El tercer grupo de pruebas tuvo como fin verificar el envío de mensajes de alerta de WhatsApp. En estas pruebas se generó humo artificialmente al quemar una pieza de madera en los cinco nodos esclavo para producir partículas mayores a 2.5 micras. Los nodos esclavo reportaron el evento en la interfaz de usuario y el mensaje fue transmitido y recibido correctamente en el teléfono móvil con un tiempo aproximado de retardo de 1.75 segundos una vez que el evento ocurrió. Tanto en estas pruebas como en el primer conjunto cuando en uno de los nodos esclavo se alcanzó el umbral de temperatura como se muestra en la Figura 10.

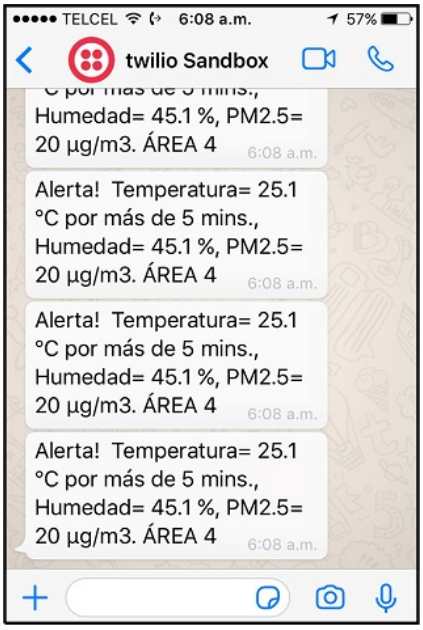


Figura 10. Mensaje de alerta enviado al teléfono móvil.

4. Conclusiones

Con base en los resultados logrados se concluye que la instalación de la red de monitorización no es intrusiva, ya que no es necesario instalar cableado adicional para su funcionamiento; el alcance de 11.5 kilómetros es mayor al que se puede lograr usando tecnologías inalámbricas tradicionales, pueden adicionarse sensores a los nodos esclavo para acceder información de otro tipo de variables realizando cambios menores en la programación.

La aplicación aquí desarrollada puede replicarse fácilmente en otros centros de datos u otro tipo de instalaciones, donde sea necesario monitorear remotamente procesos usando una solución de IoT cuya programación se basa en *software* de libre uso y código abierto. Es recomendable que si el tiempo de monitoreo de las variables o procesos es menor a 30 segundos se use una licencia de ThinkSpeak, ya que la cantidad de mensajes enviados excederá la máxima incluida en el paquete usado en este trabajo el cual no tiene costo.

Se tiene planeado trabajar a corto plazo en dos aspectos del sistema: incrementar el alcance de la red integrando nodos esclavo configurados como repetidores y desarrollar la interfaz de usuario que se ejecute en dispositivos móviles.

Referencias

[1] X. Ma, Z. Zhang, and S. Su, "Cost-aware multi-domain virtual data center embedding," *China Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 190–207, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/2XT3VUB

[2] C. Sun, Y. Wen, P. Li, W. Ye, J. Yang, J. Qiu, and J. Wen, "Self-contained wireless hall current sensor applied for two-wire zip-cords," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1–4, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2524671

[3] S. Baig, W. Iqbal, J. L. Berral, A. Erradi, and D. Carrera, "Real-time data center's telemetry reduction and reconstruction using markov chain models," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 4039–4050, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2918430

[4] G. Zhabelova, M. Vesterlund, S. Eschmann, Y. Berezovskaya, V. Vyatkin, and D. Flieller, "A comprehensive model of data center: From cpu to cooling tower," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61 254–61 266, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875623

[5] SEGOB, *Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-C-506-ONNCCE-2015*. Diario

Oficial de la Federación. Secretaría de Gobernación. México., 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/2BYWOS1

[6] TIA. (2019) Tia launches ansi/tia-942 accreditation scheme for certification of data centers, selects certac to manage program. [Online]. Available: https://bit.ly/2XTtgxB

[7] Q. Ren, L. Wang, J. Huang, C. Zhang, and Q. Huang, "Simultaneous remote sensing of temperature and humidity by lc-type passive wireless sensors," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1117–1123, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JMEMS.2014.2384591

[8] C. Jiang, Y. Qiu, H. Gao, T. Fan, K. Li, and J. Wan, "An edge computing platform for intelligent operational monitoring in internet data centers," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133 375–133 387, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939614

[9] M. Ayaz, M. Ammad-uddin, I. Baig, and e. M. Aggoune, "Wireless sensor's civil applications, prototypes, and future integration possibilities: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 4–30, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2766364

[10] S. Yu, P. Feng, and N. Wu, "Passive and semi-passive wireless temperature and humidity sensors based on epc generation-2 uhf protocol," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 2403–2411, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2375180

[11] D. Morrison, T. Ablitt, and J. Redouté, "Miniaturized low-power wireless sensor interface," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 9, pp. 4731–4732, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2442235

[12] J. Chou, J. Chen, Y. Liao, C. Lai, R. Chen, Y. Tsai, C. Lin, J. Chen, M. Huang, and H. Chou, "Wireless sensing system for flexible arrayed potentiometric sensor based on xbee module," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 14, pp. 5588–5595, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2570285

[13] T. Wang, Z. Su, Y. Xia, and M. Hamdi, "Rethinking the data center networking: Architecture, network protocols, and resource sharing," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1481–1496, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2383439

[14] O. Georgiou and U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?" *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247

[15] Q. Zhou, K. Zheng, L. Hou, J. Xing, and R. Xu, "Design and implementation of open LoRa for IoT," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100 649–100 657, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930243

[16] T. Elshabrawy and J. Robert, "Interleaved chirp spreading LoRa-based modulation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 3855–3863, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2892294

[17] B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar, and S. Islam, "Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 17 179–17 220, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968057

[18] M. Sidorov, P. V. Nhut, Y. Matsumoto, and R. Ohmura, "LoRa-based precision wireless structural health monitoring system for bolted joints in a smart city environment," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 179 235–179 251, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958835

[19] G. Premsankar, B. Ghaddar, M. Slabicki, and M. Di Francesco, "Optimal configuration of LoRa networks in smart cities," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1–1, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TII.2020.2967123

[20] W. Xu, J. Y. Kim, W. Huang, S. S. Kanhere, S. K. Jha, and W. Hu, "Measurement, characterization, and modeling of LoRa technology in multifloor buildings," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 298–310, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2946900

[21] S. Benaissa, D. Plets, E. Tanghe, J. Trogh, L. Martens, L. Vandaele, L. Verloock, F. A. M. Tuyttens, B. Sonck, and W. Joseph, "Internet of animals: characterisation of LoRa sub-GHz off-body wireless channel in dairy barns," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 18, pp. 1281–1283, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1049/el.2017.1344

[22] F. Wu, J. Redouté, and M. R. Yuce, "We-safe: A self-powered wearable IoT sensor network for safety applications based on LoRa," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 40 846–40 853, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2859383

[23] J. P. Shanmuga Sundaram, W. Du, and Z. Zhao, "A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 371–388, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949598

[24] A. Javed, H. Larijani, and A. Wixted, "Improving energy consumption of a commercial building with IoT and machine learning," *IT Professional*, vol. 20, no. 5, pp. 30–38, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MITP.2018.053891335

[25] O. Khutsoane, B. Isong, N. Gasela, and A. M. Abu-Mahfouz, "Watergrid-sense: A LoRa-based sensor node for industrial IoT applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 5, pp. 2722–2729, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2951345

[26] L. Zhao, W. Wu, and S. Li, "Design and implementation of an IoT-based indoor air quality detector with multiple communication interfaces," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 9621–9632, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2930191

[27] P. Kulkarni, Q. O. A. Hakim, and A. Lakas, "Experimental evaluation of a campus-deployed IoT network using LoRa," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 5, pp. 2803–2811, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2953572

[28] L. Leonardi, F. Battaglia, and L. Lo Bello, "Rt-LoRa: A medium access strategy to support real-time flows over LoRa-based networks for industrial IoT applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 10 812–10 823, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2942776

[29] K. Lam, C. Cheung, and W. Lee, "Rssi-based LoRa localization systems for large-scale indoor and outdoor environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 11 778–11 791, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2940272

[30] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, and C. P. Souza, "IoT network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8896816

[31] X. Zhang, M. Pipattanasomporn, T. Chen, and S. Rahman, "An IoT-based thermal model learning framework for smart buildings," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 518–527, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2951106

[32] L. Zhao, W. Wu, and S. Li, "Design and implementation of an IoT-based indoor air quality detector with multiple communication interfaces," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 9621–9632, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2930191

[33] M. M. Alam, H. Malik, M. I. Khan, T. Pardy, A. Kuusik, and Y. Le Moullec, "A survey on the roles of communication technologies in IoT-based personalized healthcare applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 36 611–36 631, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2853148

[34] J. Ruan, Y. Wang, F. T. S. Chan, X. Hu, M. Zhao, F. Zhu, B. Shi, Y. Shi, and F. Lin, "A life cycle framework of green IoT-based agriculture and its finance, operation, and management issues," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 90–96, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800332

[35] Q. Wan, Y. Teh, Y. Gao, and P. K. T. Mok, "Analysis and design of a thermoelectric energy harvesting system with reconfigurable array of thermoelectric generators for IoT applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, no. 9, pp. 2346–2358, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TCSI.2017.2708763

[36] Y. Han, C. Zhang, L. Wang, and Y. Zhang, "Industrial IoT for intelligent steelmaking with converter mouth flame spectrum information processed by deep learning," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2640–2650, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TII.2019.2948100

[37] C. Yang, D. Puthal, S. P. Mohanty, and E. Kougianos, "Big-sensing-data curation for the cloud is coming: A promise of scalable cloud-data-center mitigation for next-generation IoT and wireless sensor networks," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 48–56, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2714695

[38] K. Kaur, S. Garg, G. Kaddoum, E. Bou-Harb, and K. R. Choo, "A big data-enabled consolidated framework for energy efficient software defined data centers in IoT setups," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16,

no. 4, pp. 2687–2697, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TII.2019.2939573

[39] L. Yang, Y. Deng, L. T. Yang, and R. Lin, "Reducing the cooling power of data centers by intelligently assigning tasks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1667–1678, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2783329

[40] Bosch, "Gas sensor measuring relative humidity, barometric pressure, ambient temperature and gas (VOC) BME680," Bosch Sensortec GmbH 2020, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/2YlAvNS

Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.10
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Análisis numérico de un sistema de calentamiento de agua utilizando un colector solar de placa plana

Numerical Analisys of a Water Heating System Using a Flat Plate Solar Collector

William Quitiaquez[1,*], José Estupiñán-Campos[2], C. A. Isaza-Roldán[1], Fernando Toapanta-Ramos[2], Andrés Lobato-Campoverde[2]

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis numérico mediante CFD de un colector solar de placa plana; además, se realizó una comparación con resultados experimentales. El fluido de trabajo alcanzó una temperatura máxima de salida de 20.16 °C a las 12:00, el valor de la radiación solar se determinó para las coordenadas geográficas latitud -0.2252 y longitud -77.84; de forma similar, en este horario fue posible obtener una temperatura de la superficie del colector de 27.12 °C, como valor pico. Se determinó el menor rendimiento del dispositivo de transferencia de calor a las 10:00 con un valor de temperatura de salida del agua y temperatura máxima en la superficie del colector de 18.65 y 20.48 °C, respectivamente. Los resultados experimentales mostraron una temperatura máxima de 20.93 °C y una temperatura mínima de 19.4 °C, derivando en un error de 4.01 % entre la simulación computacional y los datos experimentales.

Palabras clave: colector, energía solar, temperatura, simulación CFD

Abstract

The aim of the present investigation was to perform a flat plate solar collector numerical analysis by CFD, in addition to a comparison with experimental results. The working fluid reached a maximum outlet temperature of 20.16 °C at 12:00, the value of solar radiation was determined for the geographical coordinates latitude -0.2252 and longitude -77.84, similarly, at this time it was possible to obtain a collector surface temperature of 27.12 °C, as a peak value. The heat transfer device lowest performance was determined at 10:00 with an outlet water temperature value and maximum temperature at the collector surface of 18.65 and 20.48 °C, respectively. The experimental results showed a maximum temperature of 20.93 °C and a minimum temperature of 19.4 °C, resulting in a 4.01 % error between the computational simulation and the experimental data.

Keywords: Collector, solar energy, temperature, CFD simulation.

[1,*]Centro de Investigación en Refrigeración y Aire Acondicionado, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
Autor para correspondencia ✉: william.quitiaquez@upb.edu.co.
https://orcid.org/0000-0001-9430-2082, https://orcid.org/0000-0002-5902-6411
[2]Carrera de Ingeniería Mecánica / GIERIMP, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
https://orcid.org/0000-0003-2286-5737, https://orcid.org/0000-0002-0838-4702,
https://orcid.org/0000-0002-6073-3439 .

Recibido: 16-05-2020, aprobado tras revisión: 12-06-2020

Forma sugerida de citación: Quitiaquez, W.; Estupiñán-Campos, J.; Isaza-Roldán, C. A.; Toapanta-Ramos, F. y Lobato-Campoverde, A. (2020). «Análisis numérico de un sistema de calentamiento de agua utilizando un colector solar de placa plana ». Ingenius. N.° 24, (julio-diciembre). pp. 97-106. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.10.

1. Introducción

En la actualidad se ha visto como la comunidad científica ha tomado conciencia acerca del uso de fuentes renovables de energía gracias a los numerosos estudios de los perjuicios producidos por la quema de combustibles fósiles para la generación y uso de energía. Razón por la cual, en los últimos años se han incrementado las investigaciones y trabajos experimentales sobre el uso de la energía solar para el aumento de temperatura de los fluidos por medio de colectores solares térmicos; entre estos se tiene a los colectores solares concentrados que han determinado que el rango operativo varíe entre 50 y 300 °C [1].

El aprovechamiento de este recurso virtualmente renovable incide con mayor fuerza en lugares con una ubicación geográfica propicia para optimizar el desempeño de los dispositivos de transferencia de calor con ayuda de energía solar, debido al ángulo de incidencia propicio e invariante por influencia de las estaciones como es el caso de países en la región ecuatorial como Ecuador [2].

Ayompe y Duffy [3], en su investigación sobre el rendimiento térmico de un sistema solar de calentamiento de agua con colectores de placa plana aplicado en un sistema de escala doméstica de circulación forzada por un año, muestran que los resultados obtenidos fueron de energía diaria recolectada con un promedio anual de 19.6 MJ / día, una fracción solar de 32.2 %, adicionalmente, una eficiencia del colector y del sistema de 37.8 y 45.6 % respectivamente.

En el funcionamiento de un colector solar se involucran varios agentes externos como la temperatura ambiente, la irradiación, posición geográfica, entre otros, como afirman Hashim *et al.* [4]. En su trabajo muestran la influencia que presenta el flujo volumétrico en la temperatura que puede alcanzar el fluido de trabajo al salir del colector solar; en su investigación experimental, realizaron dos pruebas con un caudal de 5.3 y 6.51 $L{\cdot}min^{-1}$ respectivamente, obteniendo como resultado temperaturas de salida de 51.4 y 49 °C, llegando a la conclusión que a menor flujo volumétrico mayor temperatura a la salida del colector podrá ser alcanzada.

La dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) es de gran ayuda en estudios que buscan mejorar el rendimiento en dispositivos de transferencia de calor. Es por esta razón por la que es utilizada con regularidad para desarrollar diseños mejorados de varios mecanismos que requieren transferencia de energía como calentadores de aire solares y para evaluar el potencial de generación de energía [5].

Marroquín *et al.* [6], en su investigación utilizan el *software* de simulación ANSYS, en específico su biblioteca correspondiente para dinámica de fluidos (CFD). Para el mallado se utiliza CFX-Mesh donde se considera un espacio de cara en los elementos entre 0.004 y 0.08 m, un ángulo de resolución de 30°; con respecto a la simulación, esta se desarrolla bajo el modelo de energía k-epsilon debido al flujo turbulento, obtenido un resultado que varía en un 5 % con la experimentación.

Es posible realizar un análisis comparativo con la validación del análisis CFD con resultados experimentales en busca de encontrar un margen de error permisible como afirman Mohamed *et al.* [7], quienes en su estudio de una bomba de calor multifuncional de expansión directa (DX-SAMHP, por sus siglas en inglés) toman parámetros reales como temperatura exterior ambiente en invierno de -1 a 5 °C, radiación solar de 0, 57, 100 y 200 $W{\cdot}m^{-2}$ para ingresarlos al simulador, obteniendo valores en el modelado mayores que los resultados experimentales con desviaciones promedio de ± 4 %.

En la investigación de Duarte *et al.* [8], se presenta en manera semejante un estudio comparativo validando los resultados del modelo matemático con valores experimentales, donde se utiliza una bomba de calor con un colector/evaporador de 1.65 m^2, temperatura ambiente entre 27.1 y 31.6 °C, radiación solar entre 0 y 811 $W{\cdot}m^{-2}$, entre otros parámetros, gracias a lo cual, la simulación genera una diferencia en el COP de 1.6 %, menor a la incertidumbre experimental de 5 %.

La eficiencia de los colectores solares de placa plana, de forma similar pueden variar por influencia de otras condiciones como las secciones transversales en las cuales se mueve el fluido de trabajo como muestran Andrade *et al.* [9], quienes validan su investigación mediante simulación CFD; adicionalmente, muestran una temperatura final en la salida de la tubería de 330 K y una eficiencia de 68 %.

Existen numerosas investigaciones sobre el uso de colectores solares dentro de sistemas de calentamiento, las cuales son llevadas a cabo en diversos países como se muestra en la Tabla 1, donde validan de forma experimental propuestas en simulación para un desarrollo más exacto.

De igual manera, algunos trabajos buscan validar de forma numérica propuestas experimentales para encontrar limitantes en el diseño, esto muestra la importancia de la complementariedad entre la parte de simulación y la experimental.

Tabla 1. Investigaciones realizadas en diferentes sistemas con colectores solares de placa plana

	Ji *et al.* [10]	Mohamed *et al.* [7]	Duarte *et al.* [8]	Fathabadi [11]	Rabelo *et al.* [12]	Kong *et al.* [13]
1. Tipo de colector solar						
Placa plana con cubierta	x	x	x	x		
Placa plana sin cubierta					x	x
2. Aplicación						
Agua caliente sanitaria		x	x	x	x	x
Calentamiento de espacios	x					
3. País	China	Sudán	Brasil	Grecia	Brasil	China
4. Área del colector (m^2)	4	4.22	1.65	2.42	1.57	2.1
5. Longitud del colector (m)	2	-	-	1.981	-	1.448
6. Validación	Experimental	Experimental y numérica	Experimental y numérica	Experimental	Experimental	Experimental

1.1. Descripción del colector solar

El diseño del equipo utilizado para el desarrollo del presente estudio consiste en un tubo donde ocurre el intercambio de energía al fluido de trabajo (agua) cubierto por una plancha metálica con dos aletas como se ilustra en la Figura 1.

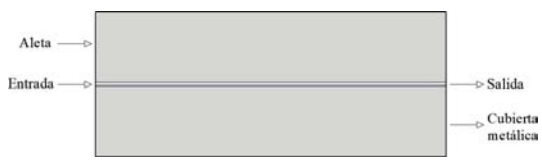


Figura 1. Diagrama esquemático del colector solar

En busca de mejorar la transferencia de calor en el dispositivo y así incrementar de forma considerable su eficiencia, el material tomado en cuenta en el modelo del colector solar es cobre para la cubierta metálica con las alteas y el tubo por el que atraviesa el fluido de trabajo con dimensiones que se especifican en la Tabla 2, tomando en cuenta las variables que inciden directamente en el aumento de temperatura en el fluido, entre la entrada y la salida del colector.

Tabla 2. Especificaciones detalladas del colector solar

Descripción	Especificación
Longitud del plato absorbente	0.960 m
Espesor del plato absorbente	0.001 m
Conductividad térmica del plato	387.6 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Densidad del material del plato	8978 $kg \cdot m^{-3}$
Espesor del plato	0.001 m
Diámetro del tubo conductor	0.0165 m
Espesor del tubo incremental y conductor	0.002 m
Área total	1.728 m^2

1.2. Principio de funcionamiento del sistema

El fluido de trabajo inicia su recorrido en el sistema al ingresar a temperatura ambiente (T_{amb}) en el colector solar donde gracias al calor transferido por la energía solar (Q_E) alcanza una temperatura de salida (T_1) mayor a la de entrada, posteriormente ingresa a un tanque donde pierde parte del calor ganado (Q_{P1}) hasta ingresar a la bomba donde gana un trabajo (W) para trasladarse a un segundo tanque donde pierde el resto del calor ganado en el colector solar (Q_{P2}) y reingresar al colector solar a temperatura ambiente como se detalla en la Figura 2.

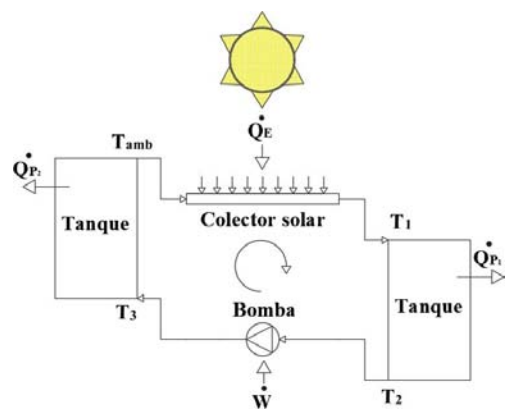


Figura 2. Ciclo del fluido de trabajo en el colector solar

2. Materiales y métodos

En un colector solar el calor es transferido de tres formas diferentes: conducción, convección y radiación, las cuales ocurren debido a la radiación solar incidente en el dispositivo, la diferencia de temperatura que existe entre el fluido de trabajo y el aire en el ambiente (T_∞), tal como se aprecia en la Figura 3.

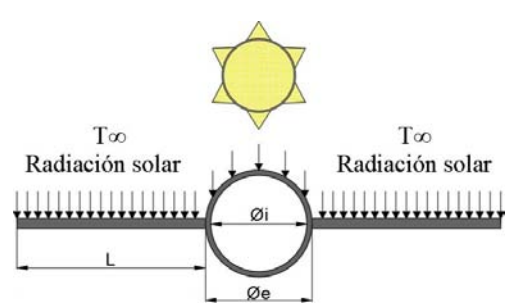


Figura 3. Transferencia de calor en un colector solar

La convección y radiación ocurre debido a la transferencia de calor a través del aire en el ambiente hasta la superficie del dispositivo y a la energía solar que recibe el colector, respectivamente. Mientras que la conducción sucede por la transferencia de calor entre la superficie del colector solar como se muestra en la Figura 4.

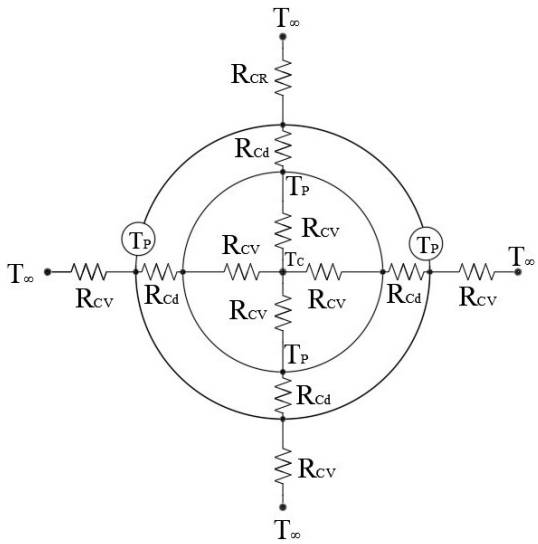


Figura 4. Red de resistencias térmicas en un colector solar

La transferencia de calor por conducción (q), explicada por la ley de Fourier, es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx) multiplicado por área (A), a través de la cual se transfiere la energía; la relación de la temperatura local (T), la distancia en la dirección del flujo de calor (x) y la conductividad térmica (k) se muestran en la Ecuación (1) [14].

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

El intercambio de calor por convección (Q_{cv}) para un modelo se puede expresar como el proceso de convección de calor entre las superficies internas y externas de la envoltura de una superficie como se expresa en la Ecuación (2) [15].

$$\dot{Q}_{cv} = h \cdot A_S \cdot (T_S - T_\infty) \tag{2}$$

Donde (h) representa el coeficiente de transferencia de calor por convección, (A_S) al área superficial, (T_S) la temperatura de la superficie y (T_∞) la temperatura del fluido a cierta distancia de la superficie. Se debe considerar que la temperatura del fluido es igual a la de la superficie del sólido en la zona de contacto [16]. Al hablar de convección es importante clasificarla en dos tipos: natural o libre y forzada. La intensidad de la convección natural se mide por el número de Grashof (Gr) y Prandtl (Pr), el cual se muestra en la Ecuación (3), estos números son característicos de la convección libre, pues al existir un incremento en estos números adimensionales, la transición el régimen de flujo se vuelve insignificante como afirman Meyer y Everts [17].

$$Gr = \frac{g \cdot \partial \cdot \beta \cdot (T_2 - T_1) \cdot L^3}{\mu^2} \tag{3}$$

Donde (g) representa la gravedad, (∂) la densidad, (β) el coeficiente de expansión volumétrica, (T_2 y T_1) son las temperaturas de frontera, (L) la longitud de pared y (μ) la viscosidad dinámica [18]. La transferencia de calor por convención libre es cuantificable por medio del número de Nusselt, el cual varía en función de las condiciones en las que se produzca el intercambio de calor, en este caso siendo convección libre, se encuentra en dependencia del número adimensional de Rayleigh (R_a) mostrado en la Ecuación (4), que resulta de la multiplicación del número de Grashof con Prandtl [19].

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_2 - T_1) \cdot R^3}{\nu \cdot \alpha} \tag{4}$$

Para lograr el cálculo correcto del número de Rayleigh es necesario tomar en cuenta al coeficiente de expansión volumétrica, la temperatura del fluido (T_2), la temperatura de la pared del recinto (T_1), el radio del recinto (R), la viscosidad cinemática (ν) y la difusividad térmica (α) [20]. La radiación térmica es aquella energía emitida por cualquier tipo de materia que se encuentre a una temperatura mayor a cero y cuya difusión de energía se muestra en la Ecuación (5), donde se presenta [21].

$$q = k_a \cdot 4\sigma \cdot T^4 \tag{5}$$

En la Ecuación (5) se presenta la transferencia de calor de la fuente radiactiva (q), la conductividad térmica (k_a), la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) en unidades del Sistema Internacional (SI) y la distribución de temperatura debido al límite del medio físico (T) [22].

2.1. Parámetros de entrada del fluido a un colector solar plano

Ciertas condiciones importantes en la admisión del fluido de trabajo en un colector solar plano fueron: velocidad, flujo másico, presión manométrica, temperatura ambiente, entre otros, como se aprecia en la Tabla 3, con una recopilación de diferentes investigaciones donde se muestran las condiciones de entrada de un colector solar.

Tabla 3. Condiciones del fluido a la entrada del colector solar

Propiedades	Cetina-Quiñones *et al.* [23]	Pang *et al.* [24]	Visa *et al.* [25]
Temperatura	45 °C	27 °C	20 °C
Flujo volumétrico	0.0167 $L \cdot s^{-1}$	0.05 $L \cdot s^{-1}$	——
Presión	——	——	300 kPa
Flujo másico	——	0.1 $kg \cdot s^{-1}$	0.02 $kg \cdot s^{-1}$
Diámetro interno	0.0254 mm	——	0.008 m
Fluido de trabajo	Agua	Agua	Agua
Material de la tubería	——	Cobre	Aluminio

2.2. Mallado y modelado

Para analizar de manera correcta las diferentes propiedades de los sólidos, líquidos y gases con el *software* de simulación es necesario construir una malla computacional eficiente, que puede estar constituida por células piramidales, tetraédricas o hexaédricas que dividen al cuerpo en varios subconjuntos más pequeños [26]. Para generar un correcto mallado de la sección del fluido es recomendable utilizar células tetraédricas por su adaptabilidad con las regiones curvas por donde atraviesa el fluido.

La independencia del mallado es importante para determinar el número óptimo de malla, esto significa que la solución es independiente de la resolución de mallado. En el análisis 3D CFD es común llevar a cabo simulaciones utilizando diferentes tamaños de malla para comparar los resultados, a pesar de esto es posible encontrar variaciones menores al 0.5 % en temperaturas, mostrando la carencia de un impacto significativo en los resultados [27].

En el presente caso de estudio fue requerido un mallado diferenciado como se ilustra en la Figura 5. Para obtener el mallado se utilizó un método de *patch conforming* tipo tetrahédrico en las figuras curvas del fluido de trabajo y el tubo que lo contiene, *edge sizing* a lo largo de las uniones entre las aletas y el arco en la pared del colector con un ángulo de curvatura 5°, el cual se muestra en la Tabla 4 como malla 1, de esta forma, se utilizan hexaedros y tetraedros típicos en el análisis CFD de los colectores solares, distribución heterogénea de sus elementos y diferente número de elementos vecinos, lo que representan un mallado no estructurado para mejorar la convergencia del resultado [28].

Debido a la búsqueda de resultados con alta fiabilidad fue necesario establecer un mallado eficiente y, por consecuencia, con un número adecuado de nodos y elementos. Sin embargo, se realizó un análisis comparativo entre diferentes variedades de mallados con distintas calidades y número de elementos, como se muestra en la Tabla 4, para comprobar la eficiencia del mallado en la presente investigación; como resultado se tomó el modelo de malla 1 con rangos de excelente calidad señalados previamente.

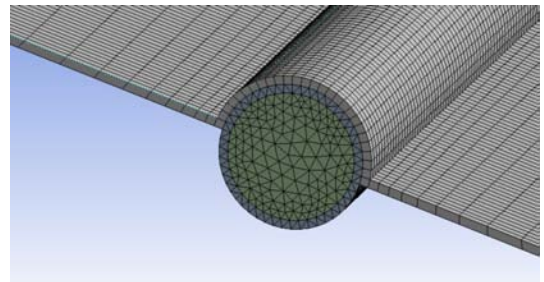


Figura 5. Malla del colector solar

Tabla 4. Condiciones del fluido a la entrada del colector solar

Malla	Número de elementos	Promedio de *skewness*
1	2272823	0.23763
2	149286	0.32162
3	92901	0.42708
4	192792	0.30576
5	247324	0.27664

Con la ayuda de la calidad de la malla se puede apreciar en la Figura 6, el diferente tipo de tendencias que genera la simulación CFD con su variabilidad de resultados, lo cual, deriva en la selección final de un mallado en particular.

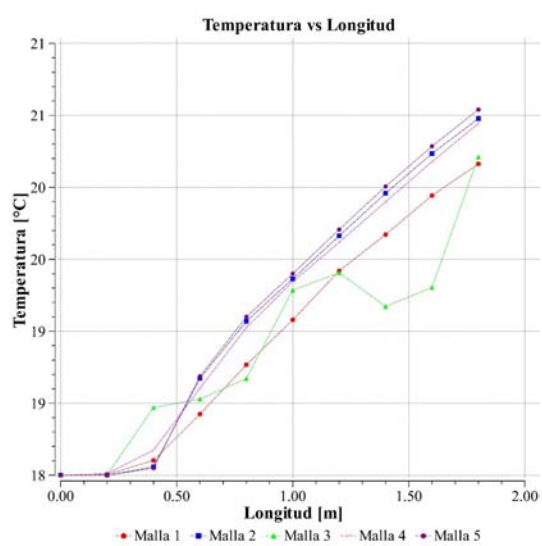


Figura 6. Variación de resultados con diferente mallado

El *software* de simulación CFD para realizar el modelado de los fluidos dinámicos emplea las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales toman en cuenta la conservación de la continuidad, el momento y la energía como se muestra en las Ecuaciones (6), (7) y (8), respectivamente [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = \nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \times (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)\right] + \\ + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{7}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} \cdot (\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T) + S_h \tag{8}$$

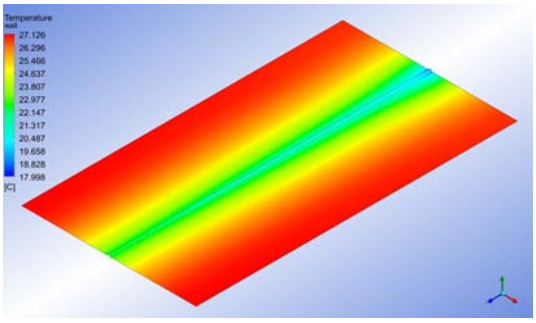
Al realizar la validación de los resultados de la simulación CFD es importante conocer el rango permisible de la variación que estos pueden tener con respecto a los valores experimentales del mismo estudio; este rango se puede medir con el error porcentual presentado en la Ecuación (9) y según distintos autores, el valor permisible se encuentra como máximo en 5.2 % [30].

$$Error\ \% = \frac{|X_{sim} - X_{exp}|}{X_{sim}} \tag{9}$$

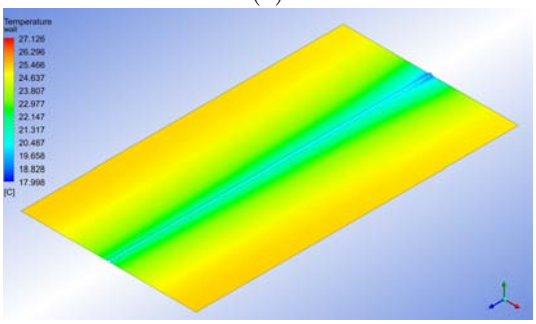
3. Resultados y discusión

El módulo de radiación del *software* de simulación CFD, calculadora solar, permitió el análisis del colector solar de placa plana con parámetros de latitud (-0.225219), longitud (-78.5248) y diferentes horarios para determinar parámetros como temperatura superficial del dispositivo de transferencia de calor como se muestra en la Figura 7 (a y b) con horarios de 11:00 a 12:00, respectivamente, donde es posible apreciar una mayor distribución de temperatura debido al pico de radiación existente a las 12:00 con un valor máximo de 27.12 °C; la misma que se atenúa a medida que transcurre el tiempo como se aprecia a las 13:00 con un menor valor de temperatura en la superficie de la aleta de 24.63 °C.

La radiación incidente en el colector se encuentra directamente relacionada con el horario en el cual se realiza la prueba, como se aprecia en la Figura 8 (a y b), generando valores pico entre las 12:00 y las 13:15 con valores de radiación disponibles entre 650 y 800 W·m^{-2}, respectivamente, influyendo de igual manera en la temperatura ambiente, un parámetro de suma importancia en la transferencia de calor hacia el dispositivo y su rendimiento.

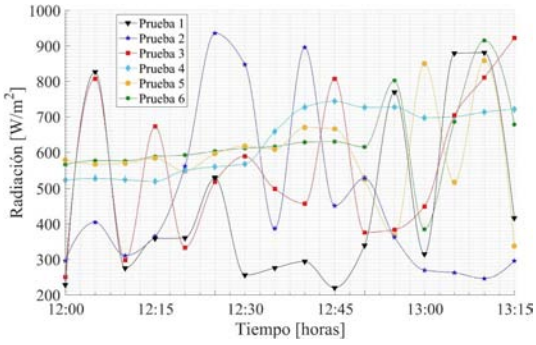


(a)

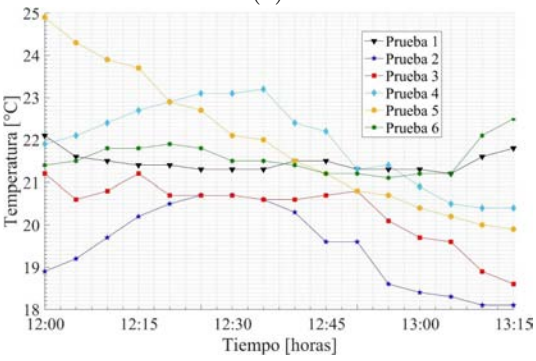


(b)

Figura 7. Temperatura en la pared exterior del colector solar



(a)



(b)

Figura 8. Variación de a) Radiación, b) Temperatura.

Debido a las variaciones comunes de los niveles de radiación que fluctúan entre 350 y 800 W·m^{-2} en la zona con latitud y longitud establecidos previamente, junto con el cambio de temperatura y flujo de calor en

la superficie del dispositivo de transferencia de calor, es posible apreciar una mayor temperatura en el centro del fluido de trabajo a lo largo del centro del tubo en el colector solar en ciertos horarios específicos como se ilustra en la Figura 9, debido a esto, se determina que la mayor temperatura a la salida del colector ocurrirá a las 12:00 con un valor de 20.2 °C y con el menor valor de 18.65 °C a las 10:00 al recorrer la totalidad de la longitud del intercambiador de calor de placa plana.

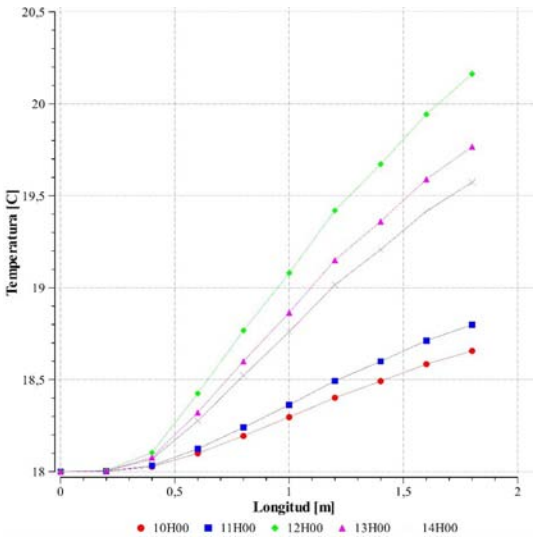
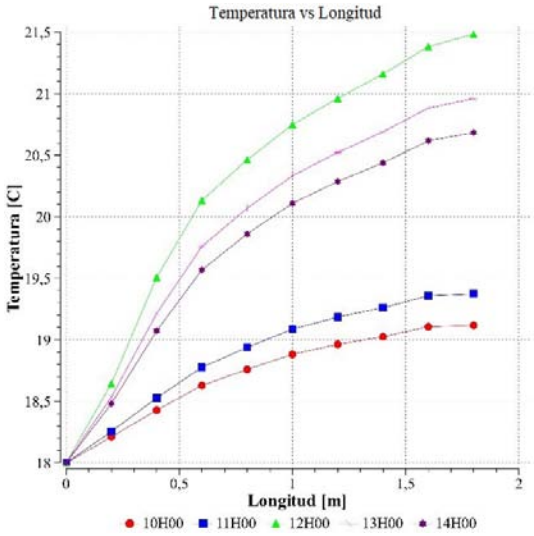
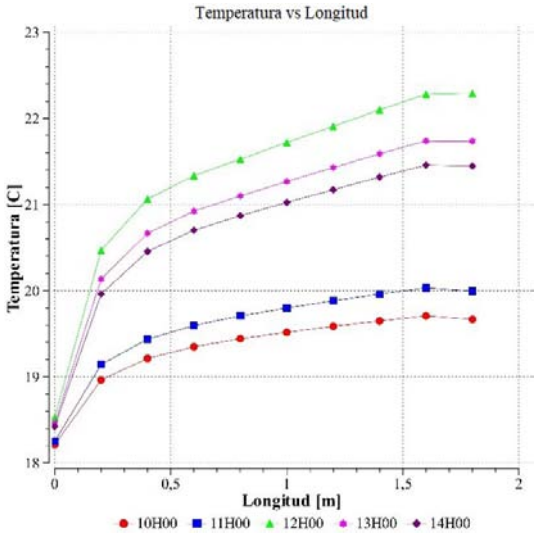


Figura 9. Diagrama comparativo de temperatura vs. longitud en el centro del colector

Es posible apreciar un mayor aumento de temperatura a medida que el fluido se acerca a la pared del tubo en el intercambiador de calor como se aprecia en la Figura 10 (a), donde la temperatura es medida a lo largo del colector solar en un espacio intermedio entre la pared del tubo y centro, adicionalmente se ilustra en la parte (b) de esta figura a la variación de temperatura en la pared del colector.



(a)



(b)

Figura 10. Diagramas comparativos de temperatura *vs.* longitud a) a ¼ de la superficie, b) superficie

Los resultados de la simulación CFD presentes en la Figura 9 muestran la misma tendencia que los resultados experimentales como se aprecia en la Figura 11 validando los resultados dentro de un margen de error del 4.01 % dentro del análisis en el centro del colector solar en los diferentes horarios.

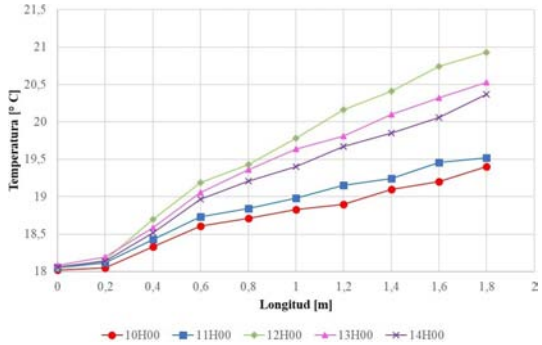


Figura 11. Diagrama comparativo de temperatura *vs.* longitud con resultados experimentales

Al realizar el análisis comparativo entre los resultados experimentales con los determinados en la simulación numérica es posible encontrar una tendencia similar en ambos casos como se muestra en la Figura 12. De la misma manera, es posible apreciar un error porcentual máximo de 4.01 %, validando los datos experimentales y de la simulación.

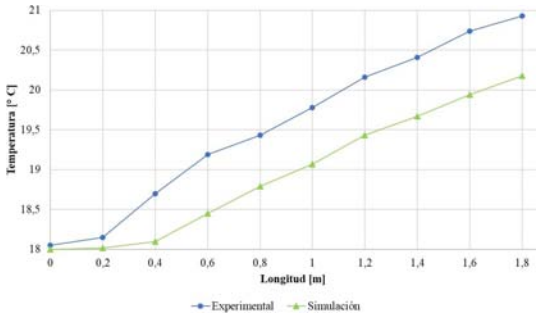


Figura 12. Diagrama comparativo en el análisis experimental y numérico a las 12:00

4. Conclusiones

En el presente estudio el análisis del rendimiento de un colector solar de placa plana fue realizado mediante un *software* de simulación CFD en el cual se ha utilizado en las diversas simulaciones realizadas, la radiación solar en diferentes horarios, la cual influye directamente en la transferencia de energía térmica hacia el fluido de trabajo mostrando varios resultados.

El valor máximo de temperatura en el fluido a la salida del colector solar es de 20.16 °C presente a las 12:00, mientras que a las 10:00 se muestra la temperatura más baja de salida del fluido con 18.65 °C debido a la baja radiación solar propia de ese horario; valores que representan una tendencia favorable para la utilización del fluido en diferentes procesos, todo esto sin descartar el uso de procesos independientes de calentamiento de fluidos para alcanzar una temperatura específica en busca de cubrir una determinada necesidad.

Debido al pico de radiación presente a las 12:00, se genera un valor máximo de flujo de calor hacia el fluido de trabajo de 96.02 $W{\cdot}m^{-2}$ mostrando la mayor cantidad de transferencia de energía en todo el rango de análisis tomado en cuenta en la investigación. Es posible apreciar una variación en la temperatura de la superficie exterior del dispositivo de transferencia de calor acorde con los niveles de radiación típicos de los diferentes horarios estudiados mostrando un valor máximo de 27.12 °C y un valor mínimo de 20.48 °C a las 12:00 y 10:00 respectivamente. Finalmente, se puede corroborar que los resultados de la simulación al ser comparados con los datos experimentares difieren en un 4.01 %.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana, Universidad Pontifica Bolivariana y la alianza «Energética 2030» (Programa de Investigación con código No. 58667), de la convocatoria «778-2017 Ecosistema Científico» de COLCIENCIAS, financiado por el Banco Mundial. El programa de investigación es administrado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) a través del contrato No. FP44842-210-2018.

Referencias

[1] L. Evangelisti, R. D. L. Vollaro], and F. Asdrubali, "Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109318, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318

[2] J. Calle-Sigüencia and O. Tinoco-Gómez, "Obtención de ACS con energía solar en el cantón Cuenca y análisis de la contaminación ambiental," *Ingenius*, no. 19, pp. 89–101, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.09

[3] L. M. Ayompe and A. Duffy, "Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate," *Applied Thermal Engineering*, vol. 58, no. 1, pp. 447–454, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.06

[4] W. M. Hashim, A. T. Shomran, H. A. Jurmut, T. S. Gaaz, A. A. H. Kadhum, and A. A. Al-Amiery, "Case study on solar water heating for flat plate collector," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 12, pp. 666–671, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.09.002

[5] E. Arteaga-López, C. Ángeles-Camacho, and F. Bañuelos-Ruedas, "Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis," *Energy*, vol. 167, pp. 181–188, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.191

[6] A. Marroquín-De Jesús, J. M. Olivares-Ramírez, O. Jiménez-Sandoval, M. A. Zamora-Antuñano, and A. Encinas-Oropesa, "Analysis of flow and heat transfer in a flat solar collector with rectangular and cylindrical geometry using CFD," *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, no. 4, pp. 553–561, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72265-0

[7] E. Mohamed, S. Riffat, S. Omer, and R. Zeinelabdein, "A comprehensive investigation of using mutual air and water heating in multi-functional dx-samhp for moderate cold climate," *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 582–600, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.075

[8] W. M. Duarte, T. F. Paulino, J. J. G. Pabón, S. Sawalha, and L. Machado, "Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water," *Solar Energy*, vol. 184, pp. 527–538, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.027

[9] A. X. Andrade Cando, W. Quitiaquez Sarzosa, and L. F. Toapanta, "CFD analysis of a solar flat plate collector with different cross sections," *Enfoque UTE,*, vol. 11, no. 2, pp. 95–108, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n2.601

[10] W. Ji, J. Cai, J. Ji, and W. Huang, "Experimental study of a direct expansion solar-assisted heat pump (dx-sahp) with finned-tube evaporator and comparison with conventional dx-sahp," *Energy and Buildings*, vol. 207, p. 109632, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109632

[11] H. Fathabadi, "Novel low-cost parabolic trough solar collector with tpct heat pipe and solar tracker: Performance and comparing with commercial flat-plate and evacuated tube solar collectors," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 210–222, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.057

[12] S. N. Rabelo, T. de F. Paulino, W. M. Duarte, S. Sawalha, and L. Machado, "Experimental analysis of the influence of water mass flow rate on the performance of a co2 direct-expansion solar assisted heat pump," *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 327–331, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.5281/zenodo.1317384

[13] X. Kong, P. Sun, S. Dong, K. Jiang, and Y. Li, "Experimental performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater with r134a in summer," *International Journal of Refrigeration*, vol. 91, pp. 12–19, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.021

[14] J. Lee and T.-H. Song, "Conduction/radiation combined heat transfer with contact resistance for application to vacuum insulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 380–388, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.085

[15] F. Jiang, Z. Li, Q. Zhao, Q. Tao, S. Lu, and K. Zhao, "The influence of exterior louver blinds' geometric and thermal attributes on the convective heat transfer at building facades," *Solar Energy*, vol. 193, pp. 654–665, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.074

[16] Y. Zhang, J. Wang, W. Liu, and Z. Liu, "Heat transfer and pressure drop characteristics of r134a flow boiling in the parallel/tandem microchannel heat sinks," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 1082–1095, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.067

[17] J. P. Meyer and M. Everts, "Chapter three - a review of the recent developments in laminar, transitional, quasi-turbulent and turbulent forced and mixed convective flow through horizontal tubes," in *Advances in Heat Transfer*, ser. Advances in Heat Transfer, E. M. Sparrow, J. P. Abraham, J. M. Gorman, and W. Minkowycz, Eds. Elsevier, 2019, vol. 51, pp. 131–205. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2019.07.001

[18] S. MOJUMDER, S. A. H. A. Sourav, S. A. H. A. Sumon, and M. A. H. MAMUN, "Combined effect of reynolds and grashof numbers on mixed convection in a lid-driven t-shaped cavity filled with water-al2o3 nanofluid," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 27, no. 5, pp. 782–794, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60540-6

[19] P. Sánchez-Palencia, N. Martín-Chivelet, and F. Chenlo, "Modelización del coeficiente de transmitancia térmica de módulos fotovoltaicos para integración en edificios," in *XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/2C4petH

[20] N. Rahbar, J. A. Esfahani, and E. Fotouhi-Bafghi, "Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still - CFD simulation and theoretical analysis," *Solar Energy*, vol. 113, pp. 313–323, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.032

[21] C.-H. Wang, Y.-Y. Feng, K. Yue, and X.-X. Zhang, "Discontinuous finite element method for combined radiation-conduction heat transfer in participating media," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 108, p. 104287, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104287

[22] B. P. Jelle, S. E. Kalnes, and T. Gao, "Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives," *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 329–356, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.024

[23] A. J. Cetina-Quiñones, A. Bassam, G. Hernández-Chan, I. Hernández Benítez, J. Hernández Reyes, and D. Lugo Chávez, "Modelación térmica de un colector solar de canal parabólico mediante el método de elementos finitos," *Ingeniería*, vol. 21, no. 1, pp. 1–12, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/2MYMg7D

[24] W. Pang, Y. Cui, Q. Zhang, G. J. Wilson, and H. Yan, "A comparative analysis on performances of flat plate photovoltaic/thermal collectors in view of operating media, structural designs, and climate conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109599, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109599

[25] I. Vişa, M. Moldovan, and A. Duţă, "Novel triangle flat plate solar thermal collector for facades integration," *Renewable Energy*, vol. 143, pp. 252–262, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/30Jsxkr

[26] D. H. Lobón, E. Baglietto, L. Valenzuela, and E. Zarza, "Modeling direct steam generation in solar collectors with multiphase CFD," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1338–1348, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.046

[27] A. Aghagoli and M. Sorin, "Thermodynamic performance of a CO_2 vortex tube based on 3d CFD flow analysis," *International Journal of Refrigeration*, vol. 108, pp. 124–137, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.08.022

[28] Z. Badiei, M. Eslami, and K. Jafarpur, "Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling," *Energy*, vol. 192, p. 116719, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116719

[29] L. Zhou, Y. Wang, and Q. Huang, "CFD investigation of a new flat plate collector with additional front side transparent insulation for use in cold regions," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 754–763, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.014

[30] D. G. Gunjo, P. Mahanta, and P. S. Robi, "CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition," *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 24–36, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.041

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

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 interdisciplinarmente 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/xB0wEl`>.

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>,
<jcalle@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 LaTeX(.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 LaTeX 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. [Onine]. 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.

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.° 24, julio/diciembre 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@lns.com.ec

OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD

UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPÍA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

ABYA YALA | UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

ECUADOR SALESIANOS DON BOSCO