Número: 30 SCOPUS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA **ECUADOR**

pISSN: 1390-650X eISSN: 1390-860X

julio/ diciembre 2023

Revista de Ciencia y Tecnología



 Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en loT para cultivos hidropónicos.

Pag. 9

 Propuesta metodológica para el diseño y análisis de un monocasco Formula Student

Pag. 42

 Red neuronal artificial evolutiva para el control de temperatura en un reactor batch de polimerización.

Pag. 79

 Impacto de la Simulación Monte Carlo de Carga no controlada de vehículos eléctricos en la generación distribuida

Pag. 120

Indexada en: SCOPUS

Ingenius

INGENIUS • Número 30 • julio/diciembre 2023. Revista 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, Ciencias de la Computación y áreas afines.

Consejo de Editores

Universidad Politécnica de Valencia, España – Editor Jefe.

John Ignacio Calle Sigüencia, PhD. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador - Editor Jefe.

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.

Orozco, PнD, 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.

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador - Editor Asociado.

MARLON XAVIER QUINDE Abril, MSc. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador - Editor Asociado.

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.

Traça DEAlmeida, 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,

RAFAEL ANTONIO BALART GIMENO, PHD, ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PHD, TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO, PHD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil - Editor Asociado.

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 v 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 dios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

DAVID ZUMOFFEN, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias delaInformación 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 2023, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

Consejo de Revisores

Federico Dominguez, PhD, Escuela Supenal de Colombia, Colombia. rior 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 Nacio-

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 Es-

tatal 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, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

DIEGO CABRERA MENDIETA, PHD, 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, PHD, 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.

sidad 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 López, PhD, 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

NATALIA GONZALEZ ALVAREZ, MSC, Univer- 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

> Andrés Sarmiento Cajamarca, MSC, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil

> RODOLFO BOJORQUE CHASI, PHD, 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.

> 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

Juan Cárdenas Tapia, sdb, PhD
José Juncosa Blasco, PhD
Juan Pablo Salgado Guerrero, PhD
Ángel Tórres Toukoumidis, PhD
Jaime Padilla Verdugo, PhD
Sheila Serrano Vincenti, MSc
Jorge Cueva Estrada, MSc
John Calle Sigüencia, PhD
Floralba Aguilar Gordón, PhD
Betty Rodas Soto, MSc
Mónica Ruiz Vásquez, MSc
Jorge Altamirano Sánchez, MSc
David Armendáriz González, MSc

Editor General

ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PHD

Consejo Técnico

Dra. Marcia Peña, Revisora de Estilo, Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco Marlon Quinde Abril, MSC, Diagramación y Maquetación LCDA. María José Cabrera, Técnica Marcalyc LCDO. Christian Arpi, Coordinador Community Managers LCDO. Andrés López, Community Manager

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)

MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)

PAULINA TORRES (Edición)

RAYSA ANDRADE (Maquetación)

MARTHA VINUEZA (Maquetación)

ADRIANA CURIEL AVILA, (Traducción)

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

Tiraje: 800 ejemplares

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento IATEX.

Ingenius

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 30

julio – diciembre 2023

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 Crossref Similarity Check turnitin





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 SHERPA/RoMEO Políticas de Autoarchivo Sherpa/Romeo.

> Los artículos de la presente edición pueden consultarse en https://ingenius.ups.edu.ec/



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









































Staatliche Bibliothek Regensburg





















THÜRINGER UNIVERSITÄTS- UND LANDESBIBLIOTHEK JENA























Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences







EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ESCRITURA DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Estimadas y estimados lectores:

La inteligencia artificial (IA) ha surgido como una herramienta poderosa que puede ayudar en la investigación y redacción científica, incluida la creación de artículos científicos de alta calidad. La integración de la tecnología de IA en el proceso de escritura tiene el potencial de revolucionar la forma en que producimos y difundimos el conocimiento científico. En este editorial, exploramos los beneficios e implicaciones del uso de la IA en la redacción de artículos científicos.

Una de las ventajas significativas de utilizar la IA en la escritura científica es su capacidad para analizar grandes cantidades de datos de manera eficiente. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden procesar y extraer ideas valiosas de conjuntos de datos complejos, lo que permite a los investigadores identificar patrones y relaciones que de otra manera podrían haber pasado desapercibidos. Esta capacidad no solo agiliza el proceso de investigación, sino que también ayuda a generar hipótesis basadas en los resultados del análisis.

Además, la IA puede ayudar en la generación automática de resúmenes y resúmenes de artículos. Al utilizar algoritmos de IA, los investigadores pueden obtener rápidamente resúmenes concisos e informativos de artículos científicos, lo que facilita una comprensión rápida de su contenido. Esto es especialmente beneficioso para los académicos que necesitan revisar numerosos artículos en plazos limitados. La generación automática de resúmenes puede condensar información esencial y proporcionar una visión general del contenido del artículo.

La IA también resulta invaluable en cuanto a mejorar el estilo y la gramática de los artículos científicos. Los modelos de lenguaje entrenados con grandes cantidades de texto pueden identificar y corregir errores comunes, como errores gramaticales, problemas de puntuación o uso incorrecto de ter-

minología científica. Esto no solo mejora la calidad general de la escritura, sino que también permite a los autores transmitir sus ideas de manera más efectiva.

Además, la IA puede brindar asistencia en la estructuración y organización de los artículos científicos. Las herramientas basadas en IA pueden analizar el contenido existente y ofrecer recomendaciones sobre cómo estructurar mejor las secciones, mejorar la coherencia y cohesión, o expresar ideas de manera más clara y precisa. Estas herramientas sirven como asistentes virtuales de escritura, apoyando a los investigadores en la creación de narrativas científicas bien organizadas y convincentes.

La tecnología de IA también puede desempeñar un papel en la detección de plagio. Los algoritmos diseñados para detectar similitudes pueden comparar el contenido de un artículo con una amplia base de datos de publicaciones existentes, identificando posibles coincidencias o similitudes excesivas. Esto ayuda a mantener la integridad y originalidad del trabajo científico, asegurando que se dé crédito donde corresponde.

Sin embargo, es importante reconocer que, a pesar de los beneficios que la IA aporta a la escritura de artículos científicos, la participación humana sigue siendo crucial. La IA debe ser vista como una herramienta de apoyo en lugar de un reemplazo para la experiencia y el juicio humano. El conocimiento, la creatividad y la experiencia de los investigadores son irremplazables en el proceso de escritura científica.

Además, se deben considerar aspectos éticos al utilizar la IA en la escritura de artículos científicos. La transparencia es de suma importancia. Los investigadores deben revelar el uso de herramientas de IA o modelos de lenguaje para garantizar la integridad y responsabilidad de su trabajo. La atribución adecuada y el reconocimiento de la contribución realizada por la IA en el proceso de escritura.

John Calle-Sigüencia, PhD EDITOR JEFE

ÍNDICE

Diseno y despliegue de un sistema de monitoreo basado en loT para cultivos hidropo- nicos	9
Design and deployment of an IoT-based monitoring system for hydroponic crops Manuel Montaño-Blacio, Jorge González-Escarabay, Óscar Jiménez-Sarango Leydi Mingo-Morocho, César Carrión-Aguirre	
Metodología basada en ciencia de datos para el desarrollo de pronóstico de la generación de energía de una planta solar fotovoltaica	19
Aplicación de raíces cruzadas polinomiales al intercambio de energía radiante entre dos geometrías triangulares	29
Propuesta metodológica para el diseño y análisis de un monocasco Formula Student Methodological Proposal for the Design and Analysis of a Formula sae monocoque Rafael Wilmer Contreras Urgilés, Carlos Ayrton Jaramillo Andrade, Erick Josué Pizarro Barrera	42
Correlación para el cálculo de la fricción turbulenta en tuberías	54
Estudio para la localización de fallas en sistemas de distribución eléctrica	64
Red neuronal artificial evolutiva para el control de temperatura en un reactor batch de polimerización	79
Luz Judith Fernández Quiroz Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel	90
Héctor-Hugo Riojas-González, Liborio-Jesús Bortoni-Anzures, Juan-Julián Martínez-Torres, Héctor A. Ruiz	
Propuesta metodológica para la protección de distancia en líneas de transmisión ante la integración de energías renovables no convencionales	106
Impacto de la simulación Montecarlo de carga no controlada de vehículos eléctricos en la generación distribuida	
Normas editoriales	135





DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS

Design and deployment of an IoT-based monitoring system for hydroponic crops

Manuel Montaño-Blacio^{1,*}, Jorge González-Escarabay², Óscar Jiménez-Sarango³, Leydi Mingo-Morocho³, César Carrión-Aguirre³

Recibido: 18-11-2022, Recibido tras revisión: 15-12-2022, Aceptado: 02-02-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

El IoT es tendencia tecnológica que hace posible sistemas inteligentes entre cosas conectadas. Su aplicación se encuentra en diferentes campos, uno de ellos es la agricultura, donde el uso de nuevas técnicas, como la hidroponía, está en auge. Es importante abordar esta área, porque la población mundial alcanzará un aproximado de 9600 millones de habitantes para el 2050, por ende, para satisfacer esta demanda se necesita que el ritmo industrial agrícola sea aún más rápido y preciso. Además, el aumento de la temperatura ambiente y los cambios climáticos por el calentamiento global también están afectando negativamente a la producción agraria. En esta investigación se presenta un sistema de monitoreo IoT escalable basado en la tecnología Sigfox con capacidades de predicción del 89,37 % a través de redes neuronales para aplicaciones agrícolas. Se proporciona una arquitectura efectiva de cuatro capas que consta de percepción, red, middleware y aplicación. Para la validación, el sistema fue construido, probado experimentalmente y validado mediante el monitoreo de la temperatura, humedad y control de la recirculación de nutrientes, en un sistema hidropónico de la ciudad de Loja en Ecuador, durante cinco meses. El sistema desarrollado es lo suficientemente inteligente para proporcionar la acción de control adecuada para el entorno hidropónico, en función de los múltiples parámetros de entrada recopilados, facilitando una gestión efectiva para los agricultores, por ende, mejorando su producción.

Palabras clave: hidroponía, Sigfox, redes neuronales, Ufox, Internet de las cosas, agricultura inteligente

Abstract

The IoT is a technological trend that enables the application of intelligent systems between connected things. IoT is being applied in different fields, including agriculture, where new techniques such as hydroponics are booming. As the increase in ambient temperature and climate changes caused by global warming have negatively affected agricultural production and the rapid growth of the world's population, which will reach approximately 9.6 billion by 2050, the industrial pace of agriculture needs to be even faster and more precise. This research presents a scalable IoT monitoring system based on Sigfox technology with 89.37% prediction capabilities through neural networks for agricultural applications. An effective four-layer architecture consisting of perception, network, middleware, and application is provided. The system was experimentally tested and validated for five months by monitoring temperature, humidity, and nutrient recirculation control in a hydroponic system in Loja, Ecuador. The developed system is smart enough to adequately control the hydroponicenvironment based on the multiple input parameters collected, facilitating effective management for farmers and improving production.

Keywords: Hydroponics, Sigfox, Neural Networks, Ufox, Internet of Things, Smart Agriculture

Forma sugerida de citación: Montaño-Blacio, M.; González-Escarabay, J.; Jiménez-Sarango, O.; Mingo-Morocho, L. y Carrión-Aguirre, C. "Diseño y despliegue de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 9-18, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01.

¹,*Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador. Autor para correspondencia [™]: mmontano@upse.edu.ec.

²Facultad de la Educación, el Arte, y la Comunicación, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

 $^{^3}$ Tecnología Superior en Electrónica, Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Loja, Ecuador.

1. Introducción

El Internet de las cosas (IoT) es una tecnología de vanguardia que en los últimos años ha traído múltiples prestaciones para la población en general y organizaciones. Uno de los principales beneficios del uso de esta tecnología como innovación es la capacidad de producir y consumir servicios en tiempo real. IoT ofrece soluciones en diferentes escenarios como tráfico, atención médica, seguridad, hogares inteligentes, ciudades inteligentes y agricultura [1-3]. En el campo de la agricultura, la tecnología IoT se utiliza en diferentes áreas y niveles de la producción industrial agrícola [4]. El principal aporte parte del monitoreo que ayuda a la automatización y recolección de información para generar cultivos e invernaderos controlados a precisión [5]. La agricultura de precisión tiene como objetivo proporcionar un sistema de apoyo a la toma de decisiones que ayude a los agricultores a implementar prácticas agrícolas eficientes, con el propósito de aumentar la rentabilidad, reducir los riesgos ambientales y preservar los recursos naturales [6,7].

Las aplicaciones de monitoreo agrícola se realizan a través de sensores o dispositivos con el objeto de avudar a los agricultores a recopilar datos relevantes que aporten significativamente al crecimiento y producción de los cultivos. Algunas propuestas basadas en IoT analizan y procesan los datos remotamente mediante la aplicación de servicios en la nube [8-10], lo que ayuda a los investigadores y agricultores a tomar mejores decisiones. Un caso práctico de gestión de IoT se propone en [11] que monitorea variables como el viento, el suelo, la atmósfera y el agua en un área extensa. Identifican soluciones de monitoreo agrícola en función de las áreas o subdominios que son el monitoreo del suelo, aire, temperatura, agua, enfermedades, ubicación, condiciones ambientales, plagas y la fertilización. Además, dan a conocer cómo el paradigma IoT mejora la interacción humana en el mundo físico a través de dispositivos electrónicos, protocolos de comunicación de bajo costo y tecnologías de comunicación.

Un caso particular es la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox, es una tecnología emergente de área amplia de baja potencia (LPWAN), que ofrece un largo alcance, transmisión de datos segura y un bajo consumo de energía [12]. Utiliza espectro de radio sin licencia en las bandas industrial, científica y médica (ISM). Además, permite la comunicación bidireccional entre usuarios y sensores a nivel individual o grupal. Por lo tanto, Sigfox es adecuado para las aplicaciones de IoT que solo requieren la transmisión de pequeños paquetes de datos y un bajo consumo de energía. Un caso relevante presentan Hernández et al. [9], diseñan un sistema de monitoreo escalable basado en IoT con capacidades de predicción para aplicaciones agrícolas. Proporcionan una arquitectura efectiva de cuatro capas e implementan la conectividad de los dispositivos

del sistema de monitorización de invernadero sobre la red Sigfox.

A pesar de los avances recientes en las tecnologías de IoT, su implementación en la agricultura presenta muchos desafíos que limitan su adopción. Uno de los principales problemas es, por supuesto, combatir la variabilidad de las condiciones climáticas dentro de los invernaderos o cultivos debido al fuerte impacto en su productividad. Es necesario colocar de manera eficiente varios puntos de medición dentro de los campos para obtener una mejor información sobre el comportamiento de las condiciones ambientales. Es por ello por lo que este trabajo tiene como objetivo el diseño y la implementación de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos hidropónicos utilizando una arquitectura de sistema escalable, modular y de bajo costo.

El sistema se enfoca en monitorear las condiciones del clima y los factores de riesgo que afectan al crecimiento de los cultivos, entre ellos se tiene la temperatura y humedad como variables relevantes. Se construye un dispositivo IoT personalizado usando la red Sigfox para enviar los datos a Internet. Se utiliza la plataforma ThingSpeak para el análisis y visualización de datos, así mismo, se crea un algoritmo de aprendizaje automático para predecir la temperatura en función de la humedad con los datos recopilados por el sistema con el fin de simular el cambio de variables climáticas para el futuro. La validación del sistema se realizó durante una prueba a un sistema hidropónico de lechuga en la ciudad de Loja. El principal aporte de la investigación es proponer un sistema práctico y escalable aplicado para monitorear y controlar los factores climáticos en cultivos. La estructura de IoT consta de una arquitectura de cuatro capas que incluye una capa de percepción para recopilar información del cultivo, una capa de red para hacer posibles las conexiones a Internet, una capa de software intermedio para habilitar los servicios en la nube, y la capa de aplicación para entregar información específica a los usuarios.

La sección 2 presenta los materiales y métodos utilizados. La sección 3 detalla la arquitectura del sistema de monitoreo IoT propuesto. La sección 4 describe el diseño y la implementación de los componentes del sistema. La sección 5 muestra la validación experimental del sistema de monitoreo implementado. Después del despliegue, los resultados experimentales verifican la efectividad del monitoreo y pronóstico de las condiciones climáticas del sistema hidropónico. Finalmente, la sección 6 da a conocer las conclusiones y líneas futuras de la presente investigación.

2. Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la escuela Marieta de Veintimilla de la ciudad de Loja, con un enfoque experimental cuantitativo, misma que se basa en el desarrollo e implementación de un sistema IoT para el monitoreo y predicción de variables ambientales tales como temperatura, humedad y radiación UV, para llevar a cabo la investigación se planteó un modelo por fases de acuerdo con la arquitectura propuesta.

La primera fase radicó en el desarrollo del prototipo IoT basado en tecnología Sigfox y componentes electrónicos de software y hardware libre. La segunda fase fue la adquisición de datos de temperatura y humedad, donde se utilizó un sensor DTH22 y un sensor UV ML8511 para determinar radiación UV. Como módulo central se contó con un controlador Ufox sincronizado a una unidad de reloj de tiempo real (RTC), que cumple con la función de activación y desactivación de una bomba de agua, misma que dota de líquido y nutrientes a un sistema de cultivo hidropónico, la parte medular del proyecto consistió en el uso de la tecnología Sigfox para transferir la información en tiempo real hacia la plataforma de IoT ThingSpeak.

La tercera fase se enfoca en un método de análisis de datos, basado en redes neuronales; la información recopilada por los sensores es la base para el modelo de aprendizaje, que tiene como objetivo la predicción de variables afines al sistema, con el propósito de predecir las condiciones del ambiente que afectan al crecimiento de las plantas. La fase final consintió en la presentación

de datos para el usuario, donde se puede monitorear el estado de los sensores, así también, encontrar su correlación, citando como ejemplo la proporcionalidad inversa que se pudo verificar entre las variables de temperatura y humedad, mismas que son importantes para determinar parámetros de cultivo en el sistema hidropónico.

2.1. Arquitectura del sistema

El estudio del Internet de las cosas (IoT) ha traído consigo una extensa literatura científica. Existen múltiples arquitecturas, marcos o modelos conceptuales para los sistemas IoT [13–17]. Sin embargo, no existe una arquitectura de referencia estándar única que abarque una variedad de tecnologías. En particular, la incorporación de tecnologías IoT para la agricultura sostenible ha atraído una atención significativa y relevante en [18,19].

La Figura 1 muestra la arquitectura multicapa propuesta para el sistema de monitoreo hidropónico basado en IoT. El diseño consta de cuatro capas, correspondientes a la capa de percepción, red, middleware y aplicación. Se enfoca en ofrecer agilidad en los procesos de producción bajo un sistema práctico y escalable. Esto significa que la arquitectura permite monitorear varias variables o un proceso completo a un costo mínimo, que beneficiará al mejoramiento y eficacia en el proceso de cultivo a través de sistemas hidropónicos o agricultura inteligente.

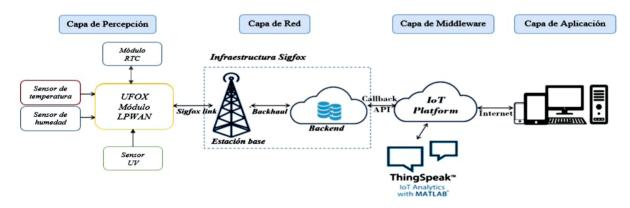


Figura 1. Arquitectura propuesta para el sistema de monitoreo

Las condiciones óptimas de crecimiento de las plantas dependerán de las necesidades y requerimientos de cada tipo de planta. Por lo tanto, un sistema de monitoreo ambiental es clave para maximizar la producción de cultivos de manera efectiva y sostenible. La capa de percepción representa los sensores y dispositivos conectados que permiten el monitoreo remoto del clima. Por lo general, los parámetros microclimáticos que determinan el rendimiento de los cultivos deben monitorearse y controlarse continuamente para garantizar que se cree un entorno óptimo. Sin embargo, la heterogenei-

dad climática puede causar diferencias significativas en cuanto a las características cuantitativas y cualitativas de las plantas, la productividad, así como el desarrollo de diversas enfermedades.

Algunos factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas son comúnmente la temperatura, la humedad relativa, el CO_2 , la luz y el agua [20]. Para el caso de estudio, el dispositivo IoT incluye solo los sensores de temperatura, humedad relativa, radiación UV y control de agua y nutrientes, que están conectados a una entrada digital, analógica y PWM, respec-

tivamente, de un microcontrolador Ufox que contiene integrador el módulo Sigfox para la comunicación. El módulo RTC se conecta con interfaz I2C al controlador, se encarga del control en tiempo para la recirculación de nutrientes al sistema, cuenta con un calendario en tiempo real que enciende una bomba cada cuatro horas por un tiempo de diez minutos, tiempo suficiente para un crecimiento efectivo de las plantas de lechuga.

Las tecnologías de comunicación tienen un papel importante para una implementación exitosa de los sistemas IoT. Existen varios estándares para la transmisión de datos entre sensores y plataformas IoT. Se pueden clasificar como redes inalámbricas de corto alcance (por ejemplo, Zigbee, Bluetooth, Z-Wave, Wifi, etc.) o redes inalámbricas de largo alcance (GPRS. 3G, 4G y 5G). Las redes de corto alcance son muy restrictivas a la hora de ofrecer una cobertura global. mientras que las soluciones de red convencionales de largo alcance son caras y requieren mucha potencia. En consecuencia, las aplicaciones de IoT han impulsado la aparición de un nuevo tipo de tecnología inalámbrica denominada red de área amplia de baja potencia (LPWAN) [21]. Estas nuevas comunicaciones inalámbricas se adaptan mejor a las necesidades de dispositivos de máquina a máquina (M2M) y de IoT, donde LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT se encuentran entre las tecnologías LPWAN líderes para implementaciones de IoT. Según el caso de uso, cada actividad comercial impone diferentes requisitos sobre el tipo de especificaciones de conectividad de IoT, como cobertura, rendimiento, tamaño de paquete, consumo de energía, costo, etc.

Para el problema de las aplicaciones de monitoreo de sistemas hidropónicos es fundamental construir conexiones que permitan principalmente el uso de hardware de bajo costo, cobertura de larga distancia, bajo consumo de energía y escalabilidad. Con estas premisas, se implementa la conectividad al dispositivo IoT del sistema propuesto sobre una red Sigfox. Una vez que los datos se recopilan en el dispositivo IoT, utiliza el módulo LPWAN para enviar datos a Internet utilizando la red Sigfox. La comunicación de datos sigue el protocolo Sigfox, donde cada dispositivo tiene una identificación única para enrutar y firmar los mensajes.

La capa de middleware, o capa de servicio, es el paso donde se crean y administran los servicios o aplicaciones de software de los usuarios. La adopción del análisis de datos en la agricultura es un desafío que implica involucrar a los pequeños y medianos agricultores en la creación de servicios de procesamiento de datos. Por lo tanto, se necesita más información y trabajo en el uso de la analítica de datos en la agricultura para optimizar el ciclo productivo de los cultivos. En este

contexto, integramos una capa de middleware escalable con la flexibilidad para el desarrollo, implementación y operaciones de software, misma que se la realiza bajo el uso de la plataforma de ThingSpeak, que nos brinda el apoyo para la gestión de servicios y procesamiento de datos.

Se propone una interfaz de usuario del sistema IoT que permite el monitoreo, visualización e interpretación de los datos provenientes de los sensores del sistema. En este caso, una interfaz de aplicación web que está integrada a la plataforma back-end de Sigfox a través de sus interfaces de programación de aplicaciones (API). La integración de la API de red se basa en solicitudes HTTPS REST bajo el método POST y proporciona la interfaz desde la pila de protocolos hasta la aplicación. Por lo tanto, la aplicación web muestra las medidas recopiladas de los sensores activando llamadas a través de la API REST de Sigfox, y para agilizar este proceso se hace uso de la interfaz de la plataforma ThingSpeak tal como se aprecia en la Figura 2.

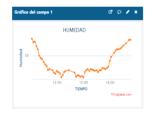




Figura 2. Visualización y monitoreo de datos

2.2. Implementación del sistema de monitoreo basado en IoT

La Figura 3 presenta el esquemático del dispositivo IoT construido para monitorear la temperatura, la humedad y radiación UV. Este prototipo consta de cuatro componentes principales: módulo de comunicación, sensor de temperatura y humedad, sensor de radiación UV y control RTC. Como dato importante, el dispositivo puede ser alimentado por batería o por electricidad de la red. En la Figura 4 se muestra el dispositivo IoT implementado, donde el módulo de comunicación Ufox se muestra en un rectángulo amarillo y permite la conexión inalámbrica a la nube, a través del servicio de red Sigfox.

La validación de los datos del dispositivo propuesto se lo realiza mediante la comparación de los datos extraídos de humedad, temperatura y radiación UV del proyecto TuData (http://tudata.info/), que consiste en una iniciativa de adquisición de datos meteorológicos para la provincia de Loja.

hidropónicos 13

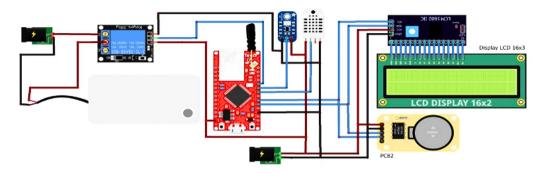


Figura 3. Esquemático del dispositivo IoT



Figura 4. Implementación del dispositivo IoT

La Figura 5 y Figura 6 guardan una estrecha relación de los datos adquiridos en el mes de enero, por ende, el sensor IoT está enviando información coherente y válida en relación con el sistema de medición metodológica TuData.

El sensor DHT22 se utiliza como una interfaz digital para medir la humedad y la temperatura. Incorpora un sensor capacitivo para medir el porcentaje de humedad relativa en el aire, y un microcontrolador para convertir valores analógicos a digitales. Tiene un rango de medición para la humedad de 0 a 100 % con una precisión de 2 %. El rango de medición de la temperatura oscila entre -40 a 80 grados centígrados, con una precisión de medición menor ± 0.5 grados centígrados a una resolución de 0.1 grados, el tiempo de sensado es de 2 segundos.

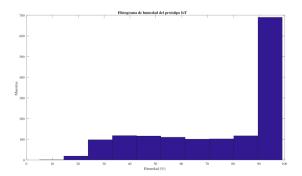


Figura 5. Histograma de humedad del dispositivo IoT creado

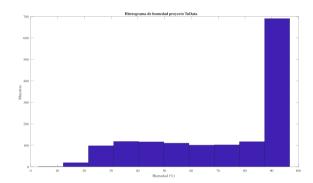


Figura 6. Histograma de humedad relativa del proyecto Tudata

El rango de alimentación es de 3 a 6 voltios de corriente continua. Para la conexión con el microcontrolador es necesario solo un hilo o cable conductor, se recomienda que este cable no exceda los 20 metros.

2.3. Predicción

Debido a los diferentes usos que las redes neuronales artificiales (RNA) tienen en la actualidad y a las ventajas que ofrecen, como el aprendizaje adaptativo, tolerancia a fallos y operaciones en tiempo real [22], dentro de análisis de datos, su campo de aplicación ha crecido considerablemente en relación con ciencias adjuntas. Las predicciones de variables climáticas es un ejemplo de aquello, donde el uso de RNA es comúnmente utilizado en la predicción de ambientes de tipo invernadero y las variables implícitas como humedad, temperatura, altitud, etc. Las técnicas de RNA están basadas en modelos matemáticos que simulan los principios de las redes neuronales biológicas, teniendo como principal característica la habilidad de aprender de su entorno [23]. Generalmente, están distribuidas en capas e interconectadas mediante una arquitectura de red [24] donde se pueden distinguir tres tipos definidos como capa de entrada, capa oculta y capa de salida. Otros enfoques de Machine Learning (ML) como la máquina de soporte vectorial, lógica difusa, modelos genéticos, etc. Pueden ser utilizados ampliamente en la predicción de variables climáticas, pero el modelo de

RNA ha demostrado obtener una mejor armonía entre rendimiento y complejidad para este problema [25] con la ventaja de una estructura de simple implementación. En función de un análisis supervisado, se definió un algoritmo de ML mediante el lenguaje R para el análisis de los patrones presentes en un sistema hidropónico, con el objetivo de predecir la temperatura en función de la humedad siguiendo un modelo de tres capas (capa de entrada, capa oculta y capa de salida) [23], debido a que dicha estructura es acorde con la teoría de Kolmogorov, la cual establece que cualquier función continua puede ser aproximada mediante una red con una capa oculta [26]. La RNA de tres capas implementada se puede observar en la Figura 7.

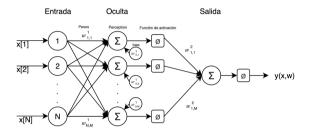


Figura 7. Estructura de la red neuronal propuesta

La predicción de la temperatura (x) en el tiempo (m) se expresa como [26], usando la ecuación (1).

$$\hat{x}[m] = \sum_{j=0}^{M} w_{j,1}^{(2)} \phi(a_j)$$
 (1)

Con (2):

$$a_{j} = \begin{cases} 0 & \text{si } j = 0\\ \sum_{i=0}^{N} \omega_{i,j}^{(1)} x [i] = X^{T} W_{j}^{(1)} & \text{caso contrario} \end{cases}$$
(2)

Donde, $\phi(aj)$ es la salida de la con función ésima neurona de activación, $tahn(a_i),$ $(1, x[1], \ldots,$ $\phi(aj)$ x $x[N])^T$ el vector de señales de entrada, y $w = \left\{w_1^{(\iota)}, \dots, w_M^{(\iota)}\right\}$, con $W_j^{(\iota)} = \left(W_{1,j,\dots,W_{N,j}}^{\iota}\right)^T$ para $\iota = 1, 2$, los conjuntos de todos los parámetros de peso y sesgo de la red. La transposición de un vector está denotada por ()^T mientras la función de activación de identidad f(z) = z determina la salida total de la red neuronal. Por último, la red es entrenada con un algoritmo de retropropagación (Resilient Backpropagation) para calcular el gradiente del error.

3. Resultados y discusión

El sistema de monitoreo IoT propuesto se implementó en un sistema hidropónico dedicado al cultivo de lechugas en la ciudad de Loja – Ecuador. Los cultivos sin suelo se están convirtiendo en una técnica eficaz para el sembrío de ciertas hortalizas. En general, las temperaturas óptimas para el desarrollo de la lechuga son los climas fríos que oscilan entre 15 y 18 grados centígrados y máximas temperaturas entre 18 y 24 grados centígrados, y humedad relativa del 70 % [27]. Se destaca que nuestro análisis cuantitativo tiene como objetivo proporcionar información sobre la comprensión actual de las nuevas tecnologías de IoT y su impacto en los métodos de producción existentes.

El tamaño del sistema hidropónico estudiado es de aproximadamente de 400 plantas, como se muestra en la Figura 8. Las mediciones de temperatura y humedad ambiente se tomaron cada 10 minutos, con un total equivalente a 144 muestras por día, durante un período de 5 meses entre enero y mayo del 2022. Sin embargo, debido a algunas fallas de comunicación, energía u otras, faltaron muestras. Para resolver este problema, estimamos las muestras faltantes usando el-vecino más cercano como técnica de imputación.



Figura 8. Caso de estudio sistema hidropónico

Se utilizó la aplicación de ThingView como interfaz de usuario móvil para monitoreo, interpretación y visualización en tiempo real. Sirve como interfaz de interacción entre el usuario y el sistema para el control y monitoreo a precisión del cultivo. La Figura 9 muestra el conjunto de datos de mediciones resultantes en la interfaz de usuario web.

hidropónicos 15

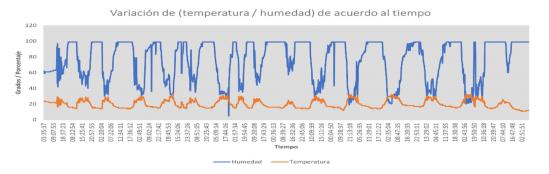


Figura 9. Mediciones de la temperatura y humedad

3.1. Entrenamiento y pruebas de RNA

Previo al proceso de entrenamiento y prueba necesaria para el ajuste del modelo de predicción, es necesario puntualizar el origen de los datos, los cuales fueron tomados desde sensores con tecnología IoT. Dichos datos fueron trasmitidos y capturados en tiempo real durante los meses de enero-mayo del 2022, teniendo en cuenta que dicha época del año corresponde a la temporada de invierno según la zona climática. Debido a esta lógica de abstracción de información del entorno, se pudieron recopilar 6000 registros, que luego de un proceso de limpieza y validación fueron depurados hasta obtener un total de 5063 registros base para la experimentación, que sirvieron como insumo principal de la red neuronal.

Los datos de entrenamiento toman en cuenta el 70 % del total de los registros validados, mientras que el 30 % restante fue utilizado en las pruebas, también, como buena práctica de experimentación, se realizó un proceso de normalización de datos para obtener un mejor acoplamiento del modelo sobre los datos, como se detalla a continuación, donde d_{max} es el valor más alto del conjunto de datos y d_{min} el más bajo, mientras que los valores de $r_{max}=1$ y $r_{min}=-1$ representan el valor máximo y mínimo para el mapeo del rango correspondientemente.

$$\bar{d}_{s} [kT] = \left[\frac{d_{s} [kt] - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} (r_{max} - r_{min}) \right] + r_{min} (3)$$

Luego del proceso de entrenamiento se realizó el cálculo de precisión de los pesos optimizados y los sesgos de la RNA, se evaluó el conjunto de datos de prueba usando el error cuadrático medio (RMSE) y una matriz de confusión para evaluar la precisión de las predicciones, siguiendo un análisis supervisado. El RMSE establece el nivel de ajuste absoluto que el modelo generó sobre los datos, comparando el valor predicho por el modelo de ML con el valor real del conjunto de datos [28], está definida por la ecuación (4).

En donde \hat{y} es un vector que contiene un conjunto de datos de n predicciones y y es el vector de los valo-

res verdaderos, para finalmente evaluar los resultados de la predicción desnormalizados comparándolos con los datos simulados sin escalar.

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_{\iota} - y_{i})^{2}$$
 (4)

3.2. Resultados de la predicción

Para la generación de resultados fue necesario realizar un diseño de experimentos homogéneos, en donde la variable principal analizada fue la cantidad de neuronas a establecer en la capa oculta de la red, para determinar el escenario con mejor comportamiento. También, se realizó una validación de variables mediante índices de correlación, los cuales establecen el nivel de asociación dentro de dos variables aleatorias cuantitativas, se considera que existe un grado de correlación cuando los datos de una variable varían sistemáticamente con los valores de la otra [29].

Como se puede observar en la Figura 10 existe un índice de correlación significativo de tipo negativo entre las variables de temperatura y humedad correspondiente a -0.95 el cual puede ser denotado como una correlación negativa fuerte.

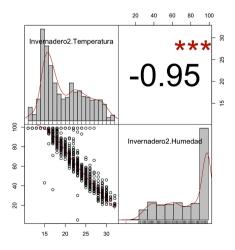


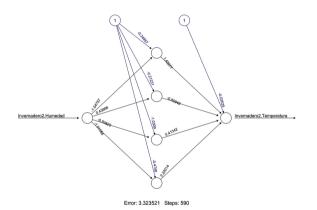
Figura 10. Índice de correlación

El diseño de experimentos hace énfasis en el número óptimo de neuronas dentro de la capa oculta de la red y a las interconexiones generadas por las relaciones entre ellas. Los experimentos fueron validados mediante la validación cruzada aleatoria y se detallan en la Tabla 1 en donde destaca el nombre del modelo, el número de neuronas en la capa oculta, el valor de RMSE generado y la precisión de la predicción obtenida.

Como se puede observar en la Tabla 1, el modelo que mejor se pudo acoplar a este tipo de datos es el definido como RNA 4, el cual consta de cuatro neuronas en la capa oculta y obtiene mejores métricas de rendimiento, definiendo un valor RMSE de 0.11 y una precisión de 89.37~% según un análisis supervisado de datos. Su estructura se puede observar en la Figura 11.

Modelo	Neuronas	Algoritmo	Función de activación	Tasa de aprendizaje	Threshold	RMSE	Precisión
RNA 1	1	Resilient Backpropagation	Sigmoid	0.01	0.01	0.14	87.33%
RNA 2	2	Resilient Backpropagation	Sigmoid	0.01	0.01	0.13	88.01%
RNA 3	3	Resilient Backpropagation	Sigmoid	0.01	0.01	0.14	87.1%
RNA 4	4	Resilient Backpropagation	Sigmoid	0.01	0.01	0.11	89.37%
RNA 5	5	Resilient Backpropagation	Sigmoid	0.01	0.01	0.14	87.33%

Tabla 1. Indicaciones del modelo



analizadas, el entorno de la experimentación y la obtención de datos, se puede definir que la temperatura podría ser pronosticada con un 89.37 % de precisión en función de la humedad según los experimentos realizados y el modelo RNA 4 definida. Finalmente, la consistencia lograda por los resultados de la predicción se ilustra en Figura 12. Aquí, los valores pronosticados se comparan con la temperatura real medida por el sistema IoT durante un período de una semana.

De esta manera, teniendo en cuenta las variables

Figura 11. Estructura de la red neuronal

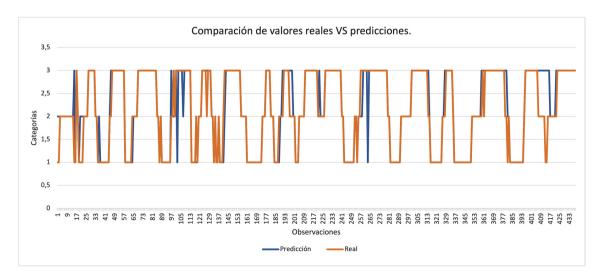


Figura 12. Temperatura del sistema y temperatura prevista

hidropónicos

En este documento se presenta una solución práctica de sistema de monitoreo basada en IoT para la agricultura inteligente, que está diseñada e implementada para brindar condiciones óptimas y soluciones rentables para los métodos de cultivo de plantas y los ciclos de vida de los sistemas hidropónicos. Se discutió a detalle el diseño y la implementación del sistema, junto con la aplicación del aprendizaje automático para la

predicción ambiental. El sistema IoT fue validado experimentalmente mediante el monitoreo de temperatura v humedad durante cinco meses. El porcentaje de disponibilidad del sistema durante este período fue del 85 % aproximadamente, debido a fallas humanas y pérdida de paquetes. Para el caso de estudio, se muestra que se puede lograr una cobertura espacial del sistema de un 100 % con solo un dispositivo IoT para un hidropónico con capacidades de cuatrocientas plantas. Así mismo, se logró un control automático preciso para la recirculación de nutrientes, dando con resultado una funcionalidad del 100 % a través del control del módulo RTC.

También se profundizó cómo se puede desarrollar aún más el sistema IoT para integrar los conceptos emergentes de la agricultura inteligente. En particular, implementamos un modelo de predicción basado en datos utilizando una red neuronal artificial. Estos resultados mostraron que el modelo RNA se puede usar con éxito para hacer un pronóstico de temperatura en función de la humedad, dando como resultado una eficiencia de la temperatura podría ser predicha con un 89.37 % con un RNA simple de tres capas y cuatro neuronas en la capa oculta. En comparación con otras soluciones similares en la literatura, el marco de IoT propuesto es más flexible e incluye las características principales para optimizar la productividad v la sostenibilidad a través de comunicación emergente. Los estudios posteriores se centrarán en realizar validaciones experimentales para invernaderos mediante el uso de control automático y perdiciones de temperatura y humedad a largo plazo. Otra dirección de investigación futura relevante es la implementación y evaluación de operaciones específicas y/o toma de decisiones estratégicas utilizando la arquitectura del sistema IoT propuesto.

Referencias

[1] M. A. Montaño Blacio, J. E. Briceño Sarmiento, O. G. Jiménez Sarango, and E. E. González Malla, "Sistema integral de hogar inteligente basado en home assistant v raspberry PI," Tecnología e innovación frente a los desafíos de un siglo en curso, pp. 101–126, 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/3IoQjYn

- [2] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu, and H. Wang, "A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with china perspective," IEEE Internet of Things Journal, vol. 1, no. 4, pp. 349–359, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2337336
- [3] S. Singh, P. K. Sharma, B. Yoon, M. Shojafar, G. H. Cho, and I.-H. Ra, "Convergence of blockchain and artificial intelligence in IoT network for the sustainable smart city," Sustainable Cities and Society, vol. 63, p. 102364, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102364
- [4] A. Medela, B. Cendón, L. González, R. Crespo, and I. Nevares, "IoT multiplatform networking to monitor and control wineries and vineyards," in 2013 Future Network & Mobile Summit, 2013, pp. 1–10. [Online]. Available: https://bit.ly/3E6vwGx
- [5] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, "Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 319, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/electronics9020319
- [6] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture," Sensors, vol. 20, no. 4, p. 1042, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s20041042
- [7] N. Zhang, M. Wang, and N. Wang, "Precision agriculture a worldwide overview," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 36, no. 2, pp. 113-132, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0
- [8] M. Monica, B. Yeshika, G. S. Abhishek, H. A. Sanjay, and S. Dasiga, "IoT based control and automation of smart irrigation system: An automated irrigation system using sensors, GSM, bluetooth and cloud technology," in 2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE), 2017, pp. 601–607. [Online]. Available: https://bit.ly/3xlFgsv
- [9] C. A. Hernández-Morales, J. M. Luna-Rivera, and R. Pérez-Jiménez, "Design and deployment of a practical IoT-based monitoring system for protected cultivations," Computer Communications, vol. 186, pp. 51-64, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.01.009
- [10] M. R. Ramli, P. T. Daely, D.-S. Kim, and J. M. Lee, "IoT-based adaptive network mechanism for reliable smart farm system,"

- Computers and Electronics in Agriculture, vol. 170, p. 105287, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105287
- [11] R. Zheng, T. Zhang, Z. Liu, and H. Wang, "An EIoT system designed for ecological and environmental management of the xianghe segment of China's Grand Canal," *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, vol. 23, no. 4, pp. 372–380, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/13504509.2015.1124470
- [12] C. Gómez, J. C. Veras, R. Vidal, L. Casals, and J. Paradells, "A sigfox energy consumption model," Sensors, vol. 19, no. 3, p. 681, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s19030681
- [13] M. Montaño, R. Torres, P. Ludeña, and F. Sandoval, "IoT management analysis using SDN: Survey," in Applied Technologies, M. Botto-Tobar, S. Montes León, O. Camacho, D. Chávez, P. Torres-Carrión, and M. Zambrano Vizuete, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 574–589. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_45
- [14] R. K. Singh, R. Berkvens, and M. Weyn, "Agrifusion: An architecture for IoT and emerging technologies based on a precision agriculture survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136 253–136 283, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116814
- [15] G. Codeluppi, A. Cilfone, L. Davoli, and G. Ferrari, "Lorafarm: A lorawan-based smart farming modular iot architecture," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2028, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s20072028
- [16] V. P. Kour and S. Arora, "Recent developments of the internet of things in agriculture: A survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 129 924–129 957, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009298
- [17] X. Shi, X. An, Q. Zhao, H. Liu, L. Xia, X. Sun, and Y. Guo, "State-of-the-art internet of things in protected agriculture," Sensors, vol. 19, no. 8, p. 1833, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s19081833
- [18] Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 4322–4334, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910
- [19] S. Santiteerakul, A. Sopadang, K. Yaibuathet Tippayawong, and K. Tamvimol, "The role of smart

- technology in sustainable agriculture: A case study of wangree plant factory," *Sustainability*, vol. 12, no. 11, p. 4640, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su12114640
- [20] R. Pertierra Lazo and J. Quispe Gonzabay, "Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido," La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, vol. 31, no. 1, pp. 118–130, 2020. [Online]. Available: http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09
- [21] D. D. Olatinwo, A. Abu-Mahfouz, and G. Hancke, "A survey on LPWAN technologies in WBAN for remote health-care monitoring," Sensors, vol. 19, no. 23, p. 5268, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s19235268
- [22] C. A. Ruiz and D. J. Matich, Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, 2001. [Online]. Available: https://bit.ly/418PqdY
- [23] C. M. Bishop, Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. [Online]. Available: https://bit.ly/3k6Ct3o
- [24] I. Ullah, M. Fayaz, N. Naveed, and D. Kim, "ANN based learning to kalman filter algorithm for indoor environment prediction in smart greenhouse," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 159371–159388, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016277
- [25] D.-H. Jung, H. S. Kim, C. Jhin, H.-J. Kim, and S. H. Park, "Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 173, p. 105402, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402
- [26] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, Pattern Classification. John Wiley & Sons, 2012. [Online]. Available: https://bit.ly/3RZpY6g
- [27] G. Saavedra, F. Corradini, A. Antúnez, S. Felmer, P. Estay, and P. Sepúlveda, Manual de producción de lechuga. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)., 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/3RY6lf3
- [28] E. L. Lehmann and G. Casella, *Theory of Point Estimation*. Springer Science & Business Media, 2006. [Online]. Available: https://bit.ly/3jX6XFb
- [29] S. van Dongen and A. J. Enright, "Metric distances derived from cosine similarity and Pearson and Spearman correlations," 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.48550/arXiv.1208.3145





METODOLOGÍA BASADA EN CIENCIA DE DATOS PARA EL DESARROLLO DE PRONÓSTICO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA DE UNA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

METHODOLOGY BASED ON DATA SCIENCE FOR THE DEVELOPMENT OF A FORECAST OF THE OWER GENERATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANT

César A. Yajure-Ramírez^{1,*}

Recibido: 03-03-2023, Recibido tras revisión: 21-04-2023, Aceptado: 26-04-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

El uso de plantas solares fotovoltaicas para la generación de energía eléctrica ha ido en constante aumento en los últimos años. Muchas de estas se conectan a la red eléctrica externa, por lo que se hace necesario el pronóstico de la energía eléctrica generada por las plantas solares para coadyuvar en la gestión del operador de la red. En esta investigación se presenta una metodología basada en la ciencia de datos para desarrollar el pronóstico de energía eléctrica generada de plantas solares fotovoltaicas, utilizando, para efectos de comparación, tres técnicas diferentes: análisis de series de tiempo, regresión lineal múltiple y red neuronal artificial. Se trabajó con los datos históricos de la potencia pico, la irradiancia solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la tasa de suciedad de una planta solar fotovoltaica experimental del NREL. Para evaluar el desempeño de los modelos se utilizan las métricas RMSE, MAE v MAPE, resultando que el modelo ARIMA del análisis de series de tiempo fue el que mejor desempeño tuvo con un MAE de 1.38 kWh, RMSE de 1.40 kWh y MAPE de 6.35 %. En el análisis de correlación se determinó que la generación de energía era independiente de la tasa de suciedad, por lo que se descartó esta variable en los modelos de regresión.

Palabras clave: aprendizaje automático, irradiancia solar, red neuronal artificial, regresión lineal, serie de tiempo, temperatura ambiente

Abstract

The use of photovoltaic solar plants for the generation of electrical energy has been constantly increasing in recent years, and many of these plants are connected to the external electrical network, which makes it necessary to forecast the electrical energy generated by the solar plants to assist in the management of the network operator. This research presents a methodology based on data science to develop the forecast of electrical energy generated from photovoltaic solar plants, using three different techniques for comparison purposes: time series analysis, multiple linear regression, and artificial neural network. Historical data of peak power, solar irradiance, ambient temperature, wind speed, and soiling rate from an experimental NREL photovoltaic solar plant were used. To evaluate the performance of the models, the RMSE, MAE, and MAPE metrics are used, resulting in the ARIMA model of the time series analysis having the best performance with a MAE of 1.38 kWh, RMSE of 1.40 kWh, and MAPE of 6.35 %. In the correlation analysis, it was determined that power generation was independent of the soiling rate, so this variable was discarded in the regression models.

Keywords: Machine learning, solar irradiance, artificial neural network, linear regression, time series, ambient temperature

Forma sugerida de citación: Yajure-Ramírez, C. A. "Metodología basada en ciencia de datos para el desarrollo de pronóstico de la generación de energía de una planta solar fotovoltaica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 19-28, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.02.

¹,*Posgrado en Investigación de Operaciones, Universidad Central de Venezuela, Venezuela. Autor para correspondencia ⊠: cyajure@gmail.com.

1. Introducción

El uso de fuentes de energías renovables para la producción de energía eléctrica se ha incrementado constantemente en los últimos años, debido a políticas públicas de algunos países para reducir la contaminación ambiental producto del uso de fuentes de combustibles fósiles, pero también para llevar la energía eléctrica a lugares remotos donde la red eléctrica tradicional no llega. De acuerdo con el reporte del estatus global de las energías renovables del 2022, durante el año 2011 el 20.4 % de la energía eléctrica provenía de fuentes renovables, principalmente hidráulica, solar, eólica, bioenergía y geotérmica. Para el 2021, este porcentaje pasó a 28.3 % (15 % hidráulica, 10 % solar y eólica, 3 % bioenergía y geotérmica). En cuanto a la energía solar fotovoltaica, para el 2021 hubo 942 GW de capacidad instalada para generación de energía eléctrica a nivel mundial, un incremento del 23 % con respecto al 2020 [1].

El uso de la energía solar para la producción de energía eléctrica ha tenido una evolución tecnológica importante, de modo que el uso de plantas solares fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica externa ha ido en aumento, incrementándose 20 % a nivel mundial para el 2021 [1]. Ahora bien, la energía proveniente de plantas solares fotovoltaicas está sujeta a las variaciones climáticas, específicamente de la irradiancia solar y la temperatura, por lo que, para coadyuvar en la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, se requiere el desarrollo de pronósticos de esa energía generada considerando los datos históricos de esas variables climáticas. Adicionalmente, este pronóstico también sería de ayuda para la gestión de la operación y el mantenimiento de estas plantas solares fotovoltaicas.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es presentar una metodología basada en la ciencia de datos para desarrollar el pronóstico de la generación de energía eléctrica de plantas solares fotovoltaicas y, adicionalmente, presentar un estudio comparativo de tres técnicas diferentes para obtener los modelos de pronósticos: modelo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) del análisis de series de tiempo, regresión lineal múltiple y red neuronal artificial. Para la evaluación de los modelos se utilizan las métricas: error absoluto medio (MAE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error porcentual absoluto medio (MAPE) y el coeficiente de determinación R^2 .

Debido a lo anterior, se hizo una revisión de distintas investigaciones relacionadas con los objetivos aquí propuestos y se encontró una variedad de publicaciones al respecto. Por ejemplo, Mittal et al. [2] hacen una revisión del uso del aprendizaje automático para pronosticar la energía fotovoltaica, reafirmando que la irradiancia solar y la temperatura son importantes para este pronóstico. Concluyen que, para una mejor

predicción de la energía solar fotovoltaica, los modelos híbridos son los de mejor desempeño.

Sharkawy et al. [3] desarrollan un estudio en el cual utilizan una red neuronal para crear un modelo de pronóstico de potencia de una planta solar en el muy corto plazo. Para ello toman cinco días de datos para entrenar el modelo, y el día restante de datos para evaluar dicho modelo. Las variables de entrada son la temperatura y la radiación. Concluyen que el modelo obtenido es adecuado, puesto que en el entrenamiento tuvo un RMSE de 0.187 MWh; en la fase de pronóstico el error absoluto fue de 0.08 MWh. Por otra parte, Kasagani y Manickam [4] realizan un estudio de pronóstico diario de la energía eléctrica haciendo uso de redes neuronales artificiales y los datos históricos de la planta solar fotovoltaica, de potencia, horas de operación, radiación solar global diaria y temperatura ambiente. Como métrica de desempeño utilizan el RMSE relativo. Encuentran que el pronóstico usando una red neuronal artificial con tres neuronas en la capa oculta tuvo el mejor desempeño, con un MAPE de $4.18~\%,~\mathrm{y}$ un RMSE relativo de 5.74 %. Pattanaik et al. [5] efectúan un análisis comparativo de distintos métodos para el pronóstico de potencia de una planta solar fotovoltaica. Encuentran que el pronóstico usando algoritmos genéticos es mucho más conveniente y preciso en comparación con el método estadístico de análisis.

Akhter et al. [6] hacen una revisión de los métodos de pronóstico de energía eléctrica generada por plantas solares fotovoltaicas, basados en aprendizaje automático y técnicas metaheurísticas. Presentan las ventajas y desventajas de cada método, y desarrollan una comparación entre los métodos heurísticos y los de aprendizaje automático. Concluyen que las técnicas híbridas (compuestas por al menos dos métodos), presentan la mejor exactitud, para todos los horizontes de pronóstico, con una reducción de alrededor del 15 % en el MAPE y en el RMSE. Asimismo, Alaraj et al. [7] desarrollan un modelo basado en ensamblaje de árboles de decisión para el pronóstico de potencia de una planta solar fotovoltaica, utilizando datos meteorológicos de la ciudad de Qassim en Arabia Saudí, y comparan sus resultados con otros modelos. Para evaluar el modelo, toman en cuenta las métricas RMSE, MAE, MAPE y el tiempo de entrenamiento. Concluyen que el modelo ENBG es el que presenta el mejor desempeño, con un MAE de 8.89 W en la fase de entrenamiento, y 12.05 W en la fase de prueba.

Anuradha et al. [8] realizan el análisis de pronóstico de potencia de una planta solar fotovoltaica aplicando distintas técnicas de aprendizaje automático y utilizando datos históricos de variables climáticas más los de la potencia generada. Las técnicas utilizadas fueron máquina de soporte vectorial, bosques aleatorios y regresión lineal. Concluyen que el modelo de regresión de bosques aleatorios fue el que tuvo mejor

exactitud en sus resultados, con un 94.01 %. Finalmente, Borunda et al. [9] presentan una metodología rápida para evaluar la mejor ubicación de una planta solar fotovoltaica, así como para pronosticar la energía eléctrica que generará, utilizando datos históricos de variables climáticas y algoritmos de aprendizaje automático. Validan la metodología comparándola con plantas solares fotovoltaicas reales, a lo largo de México.

El resto del artículo se distribuye de la siguiente manera. En la sección 2 se explica la metodología utilizada y se presentan los datos utilizados en la investigación. Seguidamente, en la sección 3 se discuten los resultados obtenidos. Luego se presentan las conclusiones que se derivan de la investigación, y al final un listado con las referencias bibliográficas utilizadas.

2. Materiales y métodos

La metodología de trabajo utilizada consiste en aplicar las etapas de un proyecto de ciencia de datos, y dentro de cada una de esas etapas, aplicar su propia metodología. Según VanderPlas [10], la ciencia de datos es un área interdisciplinaria que solapa a su vez a tres áreas distintas: las habilidades estadísticas para modelar y resumir datos, las habilidades informáticas para diseñar y utilizar algoritmos que permitan almacenar, procesar, visualizar estos datos de manera eficiente, y la experiencia en el campo o negocio específico de la investigación. En este trabajo, este campo sería el de la generación de energía eléctrica a partir de plantas solares fotovoltaicas.

En el trabajo desarrollado en Cielen [11] se presentan las etapas de un proyecto de ciencia de datos. La primera de ellas corresponde al establecimiento de los objetivos a alcanzar, lo que requiere de un conocimiento del campo, es decir, de la generación a partir de plantas solares fotovoltaicas y de las necesidades que se quieren satisfacer. La siguiente etapa consiste en obtener o extraer los datos de interés; para este caso corresponden a las mediciones regulares de las variables en una planta solar fotovoltaica, a partir de su sistema de adquisición de datos. Las variables requeridas para conformar el conjunto de datos van a depender del o de los objetivos del proyecto. Una vez se tiene disponible el conjunto de datos, la siguiente etapa es la del procesamiento de estos, lo que consiste en revisar, limpiar, transformar, v/o combinar estos datos para que tengan la estructura adecuada. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis exploratorio de los datos, utilizando técnicas estadísticas y técnicas gráficas, que pudieran ser univariadas, bivariadas, o multivariadas. En esta etapa es posible ya encontrar conocimiento de interés para el campo de estudio, por esta razón algunos proyectos llegan hasta esta etapa. Pero, si los conocimientos de la etapa anterior no son

suficientes, o si la idea es seguir adelante, se tiene la etapa de modelación de los datos, la cual consiste en aplicar algoritmos matemáticos para obtener modelos que nos brinden una mayor profundidad en el conocimiento adquirido. La cantidad y tipo de algoritmos a aplicar depende de los objetivos planteados en la primera etapa. Finalmente, con los resultados obtenidos, se procede a la etapa de toma de decisiones.

Pudiera parecer que las etapas de un proyecto de ciencia de datos se aplican de manera secuencial, pero pudieran existir casos en los que no sea de esa manera. Es decir, dependiendo de los resultados obtenidos en la etapa de análisis exploratorio y/o en la etapa de modelación, podría ser necesario regresar a la etapa de procesamiento de los datos para mejorar su estructura, a la etapa de obtención de los datos para obtener alguna otra variable, o incluso a la primera etapa para reformular los objetivos del proyecto.

Para efectos de ilustrar la metodología, esta se aplica a los datos de una planta solar fotovoltaica en particular, para lo cual, en esta sección se presenta la etapa de obtención de los datos, y la etapa del procesamiento de estos. Mientras que, en la siguiente sección se presentan las etapas del análisis exploratorio de los datos, y la de modelación de los datos.

2.1. Obtención de los datos

Los datos utilizados en esta investigación provienen del sistema de adquisición de datos de una planta solar fotovoltaica perteneciente al Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (NREL por sus siglas en inglés), ubicada en Golden, Colorado. Se extrajeron de la página web del set de datos públicos del sistema de adquisición de datos del NREL [12].

La planta está compuesta de cinco paneles solares de monosilicio, marca Sanyo, de 200 vatios de potencia pico cada uno [13]. Están instalados en un montaje fijo, con 40° de inclinación, y ángulo azimut de 180°. Los datos corresponden a mediciones realizadas y almacenadas cada minuto, de potencia pico de salida de la planta ("ac_power") en vatios, temperatura ambiente ("ambient_temp") en grados Celsius, irradiancia ("poa_irradiance") en vatios por metro cuadrado, velocidad del viento en metros por segundo ("wind_speed") y tasa de suciedad ("soiling"). Los datos inician el 25 de febrero del 2010 y culminan el 13 de diciembre del 2016, para un total de 1 558 875 filas (registros o instancias).

2.2. Procesamiento de los datos

En esta etapa, se aplican las técnicas de procesamiento de datos, entre las que se encuentran: detección de posibles datos faltantes o filas duplicadas, detección de datos atípicos, transformación de datos, combinación de columnas de datos y verificación del formato

adecuado para las distintas variables. Estas y otras técnicas se encuentran en [14], junto con la manera de aplicarlas utilizando el lenguaje de programación Python.

Luego de una revisión inicial, se detectan siete datos faltantes en la variable de temperatura ambiente y 17 362 datos faltantes en la variable de velocidad del viento. Las filas con datos faltantes de temperatura corresponden a menos del 0.001 % de las filas totales, mientras que las filas de velocidad del viento con datos faltantes corresponden a aproximadamente el 1.11 % de las totales. A pesar de ser porcentajes bajos, se decidió imputarlos con el valor medio de los tres datos más cercanos al dato faltante. Por otra parte, no se detectaron filas duplicadas.

Además de eso, a partir de los datos de la columna original de la fecha, se crean columnas correspondientes al año, mes, semana, día y hora de la lectura de datos. Así mismo, a partir de la columna de potencia eléctrica pico, se crea la columna de energía eléctrica generada ("ac_energy") en kilovatios hora (kWh), la que es utilizada como la variable objetivo en los modelos de pronóstico. En cuanto a la temperatura ambiente, esta fue cambiada de escala, pasando de unidades de grados Celsius a unidades Kelvin.

Por otra parte, se detectó que para el año 2010 no existían registros para los meses de enero, septiembre y octubre, lo que podría perturbar los resultados del análisis exploratorio. En consecuencia, este análisis se realiza con los datos existentes entre los años 2011 y 2016.

3. Análisis y resultados

En esta sección se presentan las etapas de análisis exploratorio y modelación de los datos, con la respectiva discusión de resultados.

3.1. Análisis exploratorio de los datos

Después del procesamiento a los datos realizado en la etapa anterior, se tiene un total de 1 429 678 filas o registros correspondientes a los valores minutales de las mediciones de las variables, así como de las otras variables que se generaron. Para efectos del análisis se obtuvieron set de datos con resoluciones diaria, semanal, mensual y anual. Esto se logró agrupando los datos originales con resolución minutal, en el período de tiempo correspondiente.

En primer lugar, se obtuvo un análisis descriptivo de los datos diarios, utilizando estadísticos univariados. Los resultados se presentan en la Tabla 1. Se puede observar que a excepción de la tasa de suciedad (soiling), las variables tienen su valor medio cercano al valor de la mediana. Así mismo, se puede ver que el rango de las variables: irradiancia solar y velocidad del viento

es alto, con su valor medio más cercano a su valor mínimo que a su valor máximo.

Tabla 1. Resumen estadístico descriptivo de los datos

Estadístico	Variables						
Estadistico	ac_energy	$ambient_temp$	poa_irradiance	soiling	wind_speed		
Media	4.19	286.96	465.02	95.87	1.76		
DesvEstándar	1.66	9.91	165.34	4.28	0.71		
Mínimo	0.00	252.21	33.34	75.89	0.00		
Primer cuartil	3.22	279.67	360.27	94.12	1.32		
Mediana	4.57	287.30	490.45	97.40	1.60		
Tercer cuartil	5.48	295.28	595.11	99.00	1.99		
Máximo	6.98	306.29	1,237.92	100.00	6.15		

Seguidamente, se hizo un análisis de correlación considerando a las variables climáticas, la tasa de suciedad y la generación eléctrica AC, con datos en la escala diaria. De acuerdo con Navlani et al. [15], para el cálculo del coeficiente de correlación, el método de Pearson aplica cuando los datos se distribuyen de manera simétrica (normales), pero cuando en los datos hay asimetría y/o datos atípicos, se prefiere el uso del método de Spearman. El método de Kendall también se usa cuando no se requiere que los datos sigan algún tipo de distribución. Por lo anterior, y para efectos de comparación, se utilizan los tres métodos para el cálculo de los coeficientes de todas las variables con respecto a la energía eléctrica AC. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de correlación

Variable	${f M\acute{e}todo}$				
variable	Pearson	Spearman	Kendall		
ac_energy	1.00	1.00	1.00		
poa_irradiance	0.78	0.83	0.71		
ambient_temp	0.43	0.32	0.21		
wind_speed	0.27	0.30	0.20		
soiling	0.01	0.02	0.02		

Para la interpretación de los valores de la Tabla 2 se debe recordar que el coeficiente de correlación varía entre "-1" y "1". Cuando el valor es positivo, significa que el sentido de crecimiento o de decrecimiento del par de variables es el mismo, y si el valor es negativo, el sentido es inverso. Por otra parte, el valor absoluto "1" significa que la magnitud de crecimiento o decrecimiento es igual para ambas variables, mientras que un valor "0" significa que el par de variables no están relacionadas en lo absoluto. Para los valores entre "0" v "1" se toma en cuenta lo planteado por Ratner [16], quien postula que "valores entre 0 y 0.3 (0 y -0.3) indican una relación positiva (negativa) débil. Los valores entre 0.3 y 0.7 (-0.3 y -0.7) indican una relación positiva (negativa) moderada. Los valores entre 0.7 y 1.0 (-0.7 y -1.0) indican una fuerte relación positiva (negativa)".

De la Tabla 2 se puede ver entonces que la irradiancia solar tiene una relación fuerte y positiva con

23

la energía eléctrica. Se podría decir también que la temperatura ambiente tiene una relación positiva y moderada con la energía eléctrica. La relación de la velocidad del viento con la energía eléctrica es positiva, y entre débil y moderada. Mientras que, para este caso, la relación entre la tasa de suciedad y la energía eléctrica es prácticamente de independencia.

Por otra parte, a continuación, se generan curvas temporales de las principales variables del conjunto de datos. En ese sentido, en la Figura 1 se presenta como ha sido la irradiancia solar promedio (barras) versus la energía eléctrica generada (línea) para cada uno de los años del período de estudio.

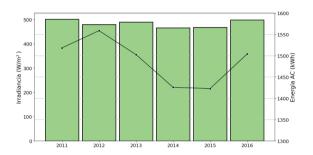


Figura 1. Irradiancia solar vs. Energía AC

Se puede observar que la irradiancia solar promedio se ha mantenido aproximadamente constante durante el período de estudio, mientras que la energía generada tuvo su máximo en el 2012, luego disminuyó hasta tener valores mínimos durante 2014 y 2015, y aumentó nuevamente durante el 2016.

Además, en la Figura 2 se presentan los valores mensuales promedio de la irradiancia solar y la potencia eléctrica, así como también la energía AC generada en el respectivo mes. Se puede ver que la producción mensual de energía se ha mantenido relativamente constante durante todo el período, y se observa que el comportamiento de la potencia sigue casi perfectamente al comportamiento de la irradiancia solar.

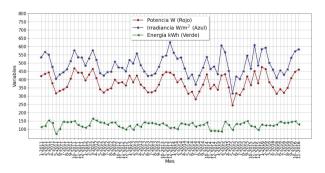


Figura 2. Comportamiento mensual de las variables

Asimismo, en la Figura 3 se presentan los valores promedios semanales de la irradiancia solar y la potencia eléctrica, así como también la energía generada AC por semana del año. Se puede ver que el comportamiento de la potencia eléctrica y la irradiancia solar es casi idéntico. En cuanto a la energía eléctrica, se observa que tiene su valor mínimo para la semana cinco del año, y su máximo en la semana trece. También se puede ver que la energía generada cae en las últimas cinco semanas del año.

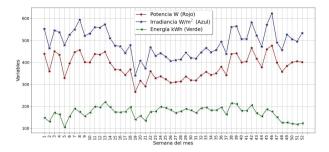


Figura 3. Comportamiento semanal de las variables

En cuanto a la escala diaria, en la Figura 4 se presentan los valores promedio diarios de la irradiancia solar y la potencia eléctrica, y la energía generada en cada uno de los respectivos días del mes. A diferencia de las curvas anteriores, en este caso se puede ver que las formas de las tres curvas son aproximadamente iguales, con valores mínimos al inicio y a mediados del mes. Asimismo, se puede decir que las curvas no tienen ningún tipo de tendencia definida (ascendente o descendente).

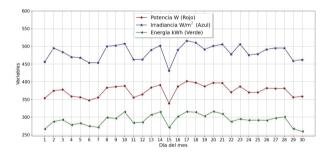


Figura 4. Comportamiento diario de las variables

Adicionalmente, para efectos de visualizar la simetría y dispersión de los datos, en la Figura 5 se presentan los diagramas Box-Plot de cada una de las variables en la escala semanal. Previamente, los valores de cada variable fueron llevados a una escala entre 0 y 1, para poderlas comparar.

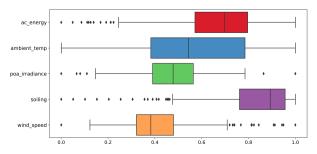


Figura 5. Diagramas Box-Plot de las variables

De la Figura 5 se puede decir que, a excepción de la temperatura ambiente, todas las otras variables presentan valores atípicos. Es importante resaltar que son valores atípicos leves, según la prueba de Tukey [17], por lo que no son imputados. De igual forma, se puede ver que la irradiancia solar es la variable más simétrica de todas, además de tener pocos datos atípicos. Asimismo, la tasa de suciedad es la variable con más datos atípicos y mayor asimetría. La temperatura ambiente es la que presenta mayor dispersión en sus datos, y la irradiancia solar es la variable con menor dispersión.

3.2. Modelación de los datos

Seguidamente se aplican algoritmos matemáticos para obtener modelos de pronóstico de la energía eléctrica generada. Específicamente se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple, un modelo de regresión de red neuronal artificial y un modelo de análisis de series de tiempo, utilizando los datos semanales. Los datos corresponden a 310 semanas, desde la semana 41 del 2010 hasta la semana 47 del 2016. Los datos de la semana 48 a la semana 50 del 2016, se utilizan para comparar el pronóstico obtenido de los tres modelos mencionados.

3.2.1. Algoritmo de regresión lineal múltiple

El algoritmo de regresión lineal múltiple (RLM) es un algoritmo de aprendizaje automático del tipo supervisado. El modelo que se obtiene a partir de este algoritmo es lineal en los parámetros (coeficientes) y no necesariamente en las variables explicativas o predictoras. La variable objetivo es la energía eléctrica AC en kWh, mientras que las variables predictoras son irradiancia solar ("poa_irradiance"), la temperatura ambiente ("ambient_temp") y la velocidad del viento ("wind_speed"). No se consideró a la tasa de suciedad (soiling) debido a su correlación nula con la variable objetivo, y, además, en un primer modelo de regresión su coeficiente en la ecuación de regresión resultó que no era estadísticamente significativo.

Se verifica que no hay correlaciones significativas entre las variables predictoras, tal como se muestra en la Figura 6, en la que se observa que todos los valores absolutos de coeficiente de correlación son menores a 0,3, indicando que las relaciones son débiles entre las variables.

El conjunto de datos, conformado por la variable objetivo más las variables predictoras, fue dividido, de manera aleatoria, en dos partes. La primera parte compuesta por el 80 % de los datos (256 registros) se utiliza para la creación y entrenamiento del modelo de regresión. La segunda parte, compuesta por el 20 % (64 registros), se utiliza para evaluar el modelo obtenido en la fase de entrenamiento. Las métricas utilizadas para la evaluación del modelo son MAE y

RMSE, pues según [18] son medidas estadísticas que se utilizan para evaluar modelos. Asimismo, se utiliza el R^2 , el cual de acuerdo con Black $et\ al.$ [19] es una "medida de la proporción de la varianza de la variable dependiente con respecto a su media que es explicada por las variables independientes o predictoras". Alaraj $et\ al.$ [7], utilizan las mismas métricas, a excepción del R^2 .

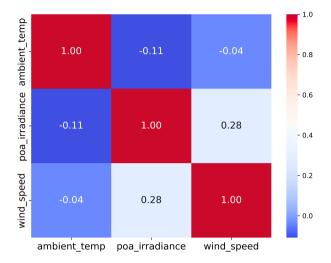


Figura 6. Matriz de correlación de las variables predictoras

Luego de aplicar el algoritmo, se obtuvieron los siguientes coeficientes: 0.446, 0.043 y 4.002, para las variables predictoras temperatura ambiente, irradiancia solar y velocidad del viento, respectivamente. Esto implica que un aumento unitario en el promedio semanal de la temperatura ambiente significa un aumento de 0.446 kWh, un aumento unitario de la irradiancia solar implicaría un aumento de 0.043 kWh en la generación de energía, y un aumento unitario en el promedio semanal de la velocidad del viento significa un aumento en la generación de energía semanal de alrededor de 4 kWh. De igual forma, el valor del intercepto es de -125.98.

En cuanto a las métricas de desempeño, los resultados se presentan en la Tabla 3. Se puede ver que las variables predictoras explican alrededor del 81 % de la varianza de la variable objetivo, es decir, el modelo presenta una buena calidad de ajuste. Por otra parte, dado que la media de la energía eléctrica generada semanalmente es de 29 kWh, el RMSE obtenido (2.87) corresponde a casi el 10 % de la media, y el MAE obtenido (2.30) es casi el 8 % de la media.

Para verificar el supuesto estadístico de normalidad de los residuos que requiere este tipo de modelos, se utiliza el test estadístico de Shapiro-Wilk, que tiene como hipótesis nula que los datos se distribuyen normalmente. El estadístico de prueba varía entre 0 y 1, y cuando está cercano a 1 es un indicativo de que los datos se distribuyen normalmente. Adicionalmente,

para verificar el rechazo o no de la hipótesis nula, se cuenta con el p-valor. Entonces, en la Tabla 3 también se observa que el valor de 0.995 para el estadístico, más un p-valor de 0.998 (superior al 5 % de significancia estadística) sugieren que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los residuos se distribuyen normalmente [20].

Tabla 3. Indicadores del modelo RLM

Indicador	Valor obtenido
R^2	0.81
RMSE (kWh)	2.87
MAE (kWh)	2.30
Prueba de Shap	iro-Wilk a los residuos
Estadístico	0.995
p-valor	0.998

3.2.2. Algoritmo de red neuronal artificial

Al aplicar la red neuronal artificial (RNA), se utilizaron los mismos datos que para el modelo de regresión lineal múltiple, al igual que la misma variable objetivo, y las mismas variables predictoras. Así mismo, para la validación cruzada del modelo también se utilizó el 80 % de los datos (256 registros) para su entrenamiento, y 20 % de los datos (64 registros) para su evaluación.

De acuerdo con Kapoor et al. [21] se trabaja con un modelo llamado "perceptrón multicapa", el cual está compuesto por la capa de entrada, la capa de salida y un grupo de capas ocultas ubicadas entre la entrada y la salida. Para este estudio se utilizan tres capas: una de entrada, otra de salida y una oculta. Todas las capas son densas, pues según lo que plantea Moolayil [22] "una capa densa es una capa regular que conecta todas sus neuronas con todas las neuronas de la capa previa".

Por otra parte, se definen funciones de activación para cada una de las capas de la red. Para las capas de entrada y oculta se aplica la función de activación lineal rectificada (ReLU), la cual permite el paso de solo valores positivos. Estas dos capas tienen un total de 256 neuronas cada una. En cuanto a la capa de salida, esta tiene una función de activación de tipo lineal con el fin de no limitar los valores del pronóstico, y solo tiene una neurona, pues es lo que se necesita para pronosticar la energía eléctrica. Según Chollet [23], adicionalmente se requiere una función de pérdida, la cual se utiliza para controlar la desviación del pronóstico con respecto a su valor esperado, de manera que para este estudio se utilizan el MAE y el MSE como funciones de pérdida. Si la desviación no es adecuada, se realimenta su valor hacia la entrada a través de una función de optimización, la que, según Chollet [23], actualiza los pesos de las entradas y se repite el ciclo. En esta investigación se hace uso del optimizador de propagación de raíz cuadrática media (RMSProp). Sharkawy *et al.* [3] también utilizan una RNA, con tres capas, pero con función de activación hiperbólica.

Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo RNA se presentan en la Tabla 4. Se puede ver que la calidad del ajuste es alrededor del 88 %, el cual es mejor al obtenido con el modelo RLM. De igual manera, se puede notar que tanto el RMSE como el MAE obtenidos son menores a los obtenidos con el modelo RLM. En cuanto al análisis de los residuos, se puede observar que se distribuyen normalmente, pues el estadístico de prueba es cercano a uno, y el p-valor es mayor al 5 % de significancia estadística.

Tabla 4. Indicadores del modelo RNA

Indicador	Valor Obtenido
R^2	0.88
RMSE (kWh)	2.35
MAE (kWh)	1.85
Prueba de Shap	iro-Wilk a los residuos
Estadístico	0.967
p-valor	0.422

3.2.3. Análisis de series de tiempo

Al aplicar el análisis a la serie de tiempo de la energía eléctrica AC generada, se obtiene un modelo ARIMA, el cual requiere de tres parámetros, el orden de la parte autoregresiva p, el orden de integración d y el orden del promedio móvil q. Además de esto, si la serie resulta estacional, también deben considerarse los tres parámetros para la parte estacional (P, D, Q). El modelo se obtiene aplicando la metodología Box-Jenkins, la cual se presenta en [24], y es mencionada con mayor detalle en [25].

La metodología inicia con la preparación de los datos, lo que pudiera incluir su transformación para estabilizar la varianza y/o su diferenciación para hacer la serie estacionaria (se define el parámetro d). Luego se seleccionan modelos iniciales potenciales, haciendo uso de la función de autocorrelación y de la función de autocorrelación parcial (se definen los parámetros p y q). Se estiman los parámetros de los modelos potenciales, y se selecciona el mejor de ellos utilizando un criterio de desempeño, que por lo general es el AIC (Akaike Information Criteria), el que según [26] es quizás el más popular para la selección del mejor modelo. Posteriormente, se pasa a la etapa de diagnóstico, en la que se desarrolla un análisis de los residuos, para verificar que sean iguales o aproximadamente iguales a un ruido blanco. Finalmente, se utiliza el modelo para realizar el pronóstico de la serie de tiempo.

Siguiendo la metodología, se aplica el test de Dickey-Fuller ampliado para verificar la estacionariedad de la serie de energía AC. De acuerdo con Gujarati y Porter [27], esta prueba también se conoce como prueba de la raíz unitaria, y es popular en la determinación de la estacionariedad o no de una serie de tiempo. El estadístico de prueba resultó menor a los tres valores críticos (1 %, 5 %, 10 %), y, además, el p-valor es aproximadamente igual a cero, por lo que se rechaza la hipótesis nula de existencia de raíz unitaria, y por consiguiente se puede decir que la serie en nivel es estacionaria. Esto último implica que el parámetro d vale cero.

Posteriormente, en la Figura 7 se muestran los gráficos de la función de autocorrelación (superior) y la función de autocorrelación parcial (inferior) de la serie de energía AC, considerando hasta 106 rezagos, puesto que los datos presentan estacionalidad anual (52 semanas). Se puede ver que hay por lo menos dos valores de autocorrelación significativos, y se confirma que la serie es estacional, con el primer valor estacional (semana 52) significativo para ambos gráficos, lo cual debe considerarse en el modelo que se proponga.

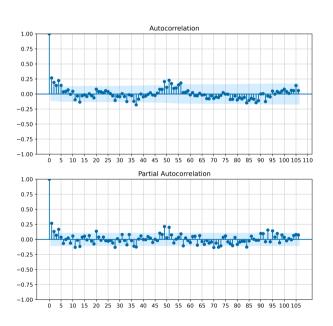


Figura 7. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial

Luego de realizar las iteraciones correspondientes, minimizando el valor de la métrica AIC y chequeando las características de los residuos obtenidos con cada uno de los modelos, el modelo seleccionado para hacer los pronósticos es ARIMA(0,0,2)(1,1,1)52. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del pronóstico realizado con el modelo ARIMA, así como por los otros modelos.

3.2.4. Comparación de los pronósticos

Como se mencionó previamente, se realiza el pronóstico de la energía eléctrica generada para las semanas 48, 49 y 50 del año 2016, utilizando cada uno de los tres modelos. Se evalúan utilizando las métricas RMSE, MAE y MAPE. Los resultados del pronóstico de energía en kWh se presentan en la Tabla 5, de la cual se observa que el pronóstico del modelo ARIMA es el que está más cercano a los valores reales de energía generada.

Tabla 5. Pronósticos de energía AC

Semana	Energía Real	Pronóstico RLM	Pronóstico RNA	Pronóstico ARIMA
48	23.63	28.15	30.13	25.04
49	20.20	23.68	22.48	18.54
50	21.92	27.36	26.02	22.97

Por otra parte, en la Tabla 6 se presentan las métricas de desempeño de los tres modelos para los pronósticos presentados en la Tabla 5. Se confirma que el modelo ARIMA es el que presenta mejor desempeño con un MAPE de alrededor del 6 % contra casi 20 % para los otros dos modelos. De igual forma, se puede ver que el MAE y el RSME son mucho menores en el caso del modelo ARIMA.

Tabla 6. Desempeño de los modelos

	Modelos			
Métricas	RLM	RNA	ARIMA	
MAE (kWh)	4.48	4.29	1.38	
RMSE (kWh)	4.55	4.63	1.40	
MAPE (%)	20.39	19.16	6.35	

Los resultados que se presentan en la Tabla 6 concuerdan con lo indicado por [25] pues estos autores proponen que los métodos de promedios móviles son convenientes para el corto plazo, mientras que los métodos de regresión son más adecuados para el mediano y largo plazo. Para estos autores el "corto plazo" está asociado a períodos de hasta tres meses de duración, mientras que el "largo plazo" son períodos de más de dos años.

4. Conclusiones

El comportamiento en el tiempo de la energía eléctrica generada es similar al comportamiento de la irradiancia solar para los datos con resolución cercana a la resolución minutal de las mediciones, es decir, resolución diaria. Este resultado concuerda con el análisis de correlación, del cual se obtuvo que la irradiancia solar tiene un valor de correlación de 0.78 con la energía eléctrica generada. Con respecto a la temperatura ambiente y la velocidad del viento, el coeficiente de

correlación con la energía eléctrica está entre moderado y débil, con 0.43 y 0.27, respectivamente.

Las variables predictoras del modelo de regresión lineal múltiple explican el 81 % de la variabilidad de la variable objetivo; del análisis de los residuos derivados de este modelo, se desprende que estos siguen una distribución normal. En cuanto al modelo de red neuronal artificial, el coeficiente de determinación resultó en un 88 %, los indicadores MAE y RMSE resultaron menores en comparación con el modelo de regresión, y los residuos están normalmente distribuidos.

En el proceso de encontrar el modelo ARIMA adecuado, se determinó que la serie de nivel de energía eléctrica AC es estacionaria, y que, además, tiene estacionalidad anual. El modelo obtenido minimiza el criterio AIC; los residuos se distribuyen de manera independiente, es decir, no están correlacionados serialmente.

Al realizar pronósticos con los modelos obtenidos, el modelo ARIMA resultó con el mejor desempeño, pues arrojó los valores mínimos de los tres indicadores de error: MAE, RMSE, y MAPE, con 1.38 kWh, 1.40 kWh y 6.35 %, respectivamente. Luego estuvo el modelo de red neuronal con los indicadores MAPE y MAE menores a los obtenidos con el modelo de regresión lineal múltiple, pero con la métrica RMSE más alta de los tres modelos.

Referencias

- [1] REN21, Renewables 2022 Global Status Report. Renewables Now - Paris 2022, 2022. [Online]. Available: https://bit.ly/3I09MhE
- [2] A. Kumar Mittal, K. Mathur, and S. Mittal, "A review on forecasting the photovoltaic power using machine learning," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2286, no. 1, p. 012010, jul 2022. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2286/1/012010
- [3] A.-N. Sharkawy, M. Ali, H. Mousa, A. Ali, and G. Abdel-Jaber, "Machine learning method for solar PV output power prediction," SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications, vol. 3, no. 2, pp. 123–130, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.21608/svusrc.2022.157039.1066
- [4] D. V. S. Krishna Rao Kasagani and P. Manickam, "Modeling of solar photovoltaic power using a two-stage forecasting system with operation and weather parameters," Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol. 0, no. 0, pp. 1–19, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2032880
- [5] D. Pattanaik, S. Mishra, G. P. Khuntia, R. Dash, and S. C. Swain, "An innovative learning approach

- for solar power forecasting using genetic algorithm and artificial neural network," *Open Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 630–641, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1515/eng-2020-0073
- [6] M. N. Akhter, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and N. Mohamed Shah, "Review on forecasting of photovoltaic power generation based on machine learning and metaheuristic techniques," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 7, pp. 1009–1023, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5649
- [7] M. Alaraj, A. Kumar, I. Alsaidan, M. Rizwan, and M. Jamil, "Energy production forecasting from solar photovoltaic plants based on meteorological parameters for qassim region, Saudi Arabia," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 83 241–83 251, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087345
- [8] K. Anuradha, D. Erlapally, G. Karuna, V. Srilakshmi, and K. Adilakshmi, "Analysis of solar power generation forecasting using machine learning techniques," E3S Web Conf., vol. 309, p. 01163, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901163
- [9] M. Borunda, A. Ramírez, R. Garduno, G. Ruiz, S. Hernández, and O. A. Jaramillo, "Photovoltaic power generation forecasting for regional assessment using machine learning," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 8895, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en15238895
- [10] J. VanderPlas, Python data science handbook: Essential tools for working with data. O'Reilly Media, Inc., 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/3BkwSeM
- [11] D. Cielen, A. Meysman, and M. Ali, Introducing Data Science: Big Data, Machine Learning, and more, using Python tools. Manning Publication, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/42wWD80
- [12] DuraMAT. (2023) PVDAQ time-series with soiling signal Data and Resources. Durable Module Materials Consortium. [Online]. Available: https://bit.ly/42NKc7t
- [13] SolarDesignTool, Sanyo HIP200BA3 (200W) Solar Panel. SolarDesignTool, 2023. [Online]. Available: https://bit.ly/3pu1dFk
- [14] W. McKinney, Python for Data AnalysisOreilly and Associate Series. "O'Reilly Media, Inc.", 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3HZnfGr

- [15] A. Navlani, A. Fandango, and I. Idris, Python Data Analysis: Perform data collection, data processing, wrangling, visualization, and model building using Python. Packt Publishing Ltd, 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/42voHsb
- [16] B. Ratner, Statistical and Machine-Learning Data Mining:: Techniques for Better Predictive Modeling and Analysis of Big Data. CRC Press, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/3VPx933
- [17] I. A. Uribe, "Guía metodológica para la selección de técnicas de depuración de datos," Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2010. [Online]. Available: https://bit.ly/3VQ5n6t
- [18] D. C. Montgomery, C. L. Jennings, and M. Kulahci, Introduction to Time Series Analysis and Forecasting. Wiley Series in Probability and Statistics, 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/3LTZiRS
- [19] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*. Pearson Education Limited, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3LWEHMN
- [20] V. Platas García, Contrastes de normalidad. Universidade de Santiago de Compostela. Facultade de Matemáticas, 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/3MfxZ5Z

- [21] A. Gulli, A. Kapoor, and S. Pal, *Deep Learning with TensorFlow 2 and Keras*. Packt Publishing, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/42MPT5r
- [22] J. Moolayil, Learn Keras for Deep Neural Networks: A Fast-Track Approach to Modern Deep Learning with Python. Apress, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/3nMtrL4
- [23] F. Chollet, Deep Learning with Python. Manning Publications Company, 2017. [Online]. Available: https://bit.ly/3LV4a9w
- [24] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, Time Series Analysis: Forecasting and Control. Wiley Series in Probability and Statistics, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/44OEALU
- [25] S. Makridakis, S. Wheelright, and R. Hyndman, Manual of Forecasting: Methods and Applications. Wiley-Interscience, 1998. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2528.4880
- [26] T. C. Mills, Applied Time Series Analysis: A Practical Guide to Modeling and Forecasting. Elsevier, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/42sM5Xd
- [27] D. N. Gujarati and D. C. Porter, Econometría. McGraw-Hill Interamericana, 2010. [Online]. Available: https://bit.ly/44Tq0mc





APLICACIÓN DE RAÍCES CRUZADAS POLINOMIALES AL INTERCAMBIO DE ENERGÍA RADIANTE ENTRE DOS GEOMETRÍAS TRIANGULARES

Polynomial cross-roots application for the exchange of radiant energy between two triangular geometries

Yanan Camaraza-Medina^{1,*}

Recibido: 12-02-2023, Recibido tras revisión: 21-04-2023, Aceptado: 26-04-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

El factor de visión entre superficies es esencial en la transferencia de calor por radiación. En la actualidad, para evaluar los factores de visión entre geometrías triangulares con bordes comunes y ángulo θ no se dispone de soluciones analíticas, debido a la elevada complejidad matemática asociada a su desarrollo. Para estas configuraciones, la literatura solo tiene las soluciones gráficas de Sauer, cuvo uso genera errores medios del 12 %. En este trabajo se desarrolla un método aproximado que no genere una alta complejidad matemática y que garantice un ajuste inferior al 12 %. Para este propósito fueron estudiadas 32 configuraciones geométricas diferentes (8 básicas v 24 derivadas), siendo obtenidas las soluciones para cada uno de los casos evaluados. Para la validación de los modelos obtenidos se usaron 42 dimensiones diferentes de emisor y receptor, siendo computados en cada caso los factores de visión mediante la solución analítica (SA), la solución numérica obtenida con la regla múltiple de Simpson 1/3 (RMS) con cinco intervalos y mediante la raíz cruzada de Bretzhtsov (RCB), comparándose finalmente los resultados obtenidos en cada uno los ocho casos básicos. En todos los casos evaluados, la RCB mostró los mejores ajustes, con un error de ± 6 % en más del 90 % de las muestras, mientras que la RMS mostró una dispersión media de ± 6 %en el 65 % de los datos. La naturaleza práctica de la contribución y los valores razonables de ajuste obtenidos, establecen a la propuesta como una herramienta adecuada para su uso en la ingeniería térmica.

Palabras clave: superficies triangulares, raíz cruzada de Bretzhtsov, factor de visión

Abstract

The view factor between surfaces is essential in radiative heat transfer. Currently, there are no analytical solutions to evaluate the view factors between triangular geometries with common edges and angle θ due to the high mathematical complexity associated with their development. For these configurations, the literature only has Sauer's graphical solutions, which generate average errors of 12%. This study developed an approximate method that does not involve high mathematical complexity and guarantees a fit of less than 12%. For this purpose, 32 different geometric configurations were studied (8 basic and 24 derived), obtaining the solutions for each evaluated case. 42 different transmitter and receiver dimensions were used to validate the models obtained. The vision factors were computed in each case using the analytical solution (AS), the numerical solution obtained with Simpson's 1/3 multiple rules (SMR) with five intervals, and Bretzhtsov's cross-root (BCR). The results obtained in each of the eight base cases were compared. In all cases evaluated, the BCR showed the best fits with an error of $\pm 6\%$ in more than 90% of the samples, while the SMR showed an average scatter of $\pm 6\%$ in 65% of the data. The practical nature of the contribution and the reasonable fitting values obtained show that this proposal is a suitable tool for thermal engineering.

Keywords: triangular surfaces, Bretzhtsov cross-root, view factor

Forma sugerida de citación: Camaraza-Medina, Y. "Aplicación de raíces cruzadas polinomiales al intercambio de energía radiante entre dos geometrías triangulares," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 29-41, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.03.

^{1,*}Technical Sciences Faculty, University of Matanzas, Cuba. Autor para correspondencia ⊠: yanan.camaraza@umcc.cu.

1. Introducción

En la ingeniería térmica es requerido evaluar la radiación térmica entre superficies. El factor de visión es quien establece que fracción de la energía radiante emitida por una superficie es interceptada por otra [1].

La relación geométrica entre dos superficies y su influencia sobre el factor de visión ha sido objeto de estudio durante décadas, siendo obtenidas soluciones numéricas y analíticas para disímiles configuraciones geométricas [2–5]. Una compilación extensa de factores de visión, con más de 320 configuraciones diferentes, fue dada por Howell [6].

El salto acelerado del uso de las técnicas computacionales ha generalizado el uso de programas comerciales basados sobre el método de elementos finitos (MEF) en la solución de problemas de radiación térmica [7–10].

Los problemas tridimensionales de bordes se reducen a superficies con bordes comunes y ángulo θ incluido. Sin embargo, para este tipo de geometrías el uso del álgebra de factores de forma es muy tedioso, siendo preferidas las soluciones numéricas, entre ellas el MEF [11–13].

En el MEF, los mallados generalmente utilizan elementos triangulares y raramente usan rectángulos o cuadrados, a menos que la geometría global sea un cubo perfecto. La determinación de una solución analítica para el factor de visión entre geometrías triangulares requiere de sumas de integrales múltiples, debido al cambio de los contornos de integración. Las soluciones en muchos casos no son funciones elementales, siendo requerido manipular funciones trigonométricas inversas, polilogaritmos y sumas de series infinitas [14].

Esto propicia que la integración directa sea una tarea extremadamente engorrosa para geometrías no compartidas o sin bordes comunes, lo cual hace preferir la integración numérica. Por este motivo, se carece de soluciones analíticas para este tipo de geometrías [15].

Mediante RMS con cinco intervalos, fueron graficados los factores de visión para varias geometrías triangulares perpendiculares y con borde común [16]. Sin embargo, su interpretación gráfica genera errores medios del 12 %, además de no ser aplicables al MEF, pues no pueden ser discretizados. Actualmente, en la literatura técnica especializada, para obtener los factores de visión entre geometrías triangulares solo se dispone de esta solución gráfica [6–13].

El método de RCB brinda un ajuste razonable durante la aproximación de funciones complejas, por tal motivo puede ser utilizado para generar las expresiones requeridas en la discretización del MEF. El método RCB es similar al MEF, pues su concepción matemática se basa en la formación de nodos, obteniéndose los ajustes con polinomios a partir de la interconexión de los nodos [17]. A partir de lo anteriormente planteado, se muestra que en la actualidad se carece

de soluciones analíticas (exactas o aproximadas) para la estimación de los factores de visión entre las geometrías triangulares con bordes comunes y ángulo θ incluido.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar soluciones aproximadas para el cálculo de los factores de visión entre geometrías triangulares con bordes comunes y ángulo θ incluido, que no muestren una alta complejidad matemática y garanticen un ajuste adecuado respecto a la SA. Así es posible establecer un nuevo método de análisis, para su uso en el MEF.

En esta investigación, se desarrollan las soluciones analíticas exactas para ocho geometrías triangulares básicas y sus respectivas RCB. Para establecer comparaciones se calcularon 42 ejemplos con varias relaciones de aspecto para cada geometría, usando la SA, la RCB y la RMS.

Dado el carácter práctico de la contribución y los valores razonables de los ajustes obtenidos, la propuesta es una herramienta adecuada para su aplicación a la ingeniería térmica y prácticas afines que requieren cálculos de radiación térmica entre geometrías triangulares.

2. Materiales y métodos

2.1. Definición del factor de visión

El factor de visión F_{12} depende de la posición y configuración geométrica de las superficies emisora A_1 y receptora A_2 , pudiendo ser definido como la fracción de la radiación que abandona la primera y que es interceptada por la segunda, lo cual es expresado como [18], en la ecuación (1)

$$F_{12} = \frac{1}{\pi A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos O_1 \cos O_2}{r^2} \ dA_2 \ dA_1 \quad \ (1)$$

Donde: O_1 , O_{2^-} ángulos entre el vector normal a las áreas dA_1 y dA_2 y la línea que conecta el centro de las superficies A_1 y A_2 , respectivamente. r-distancia entre los centros de las superficies A_1 y A_2 (véase la Figura 1).

La ecuación (1) requiere una doble integración sobre las superficies, lo cual resulta ser muy laborioso, pues se debe manipular un grupo elevado de integrales inmediatas y su posterior factorización.

El análisis puede ser simplificado mediante aproximaciones numéricas, pues con un grupo razonable de intervalos, puede ser obtenido un ajuste adecuado. Para configuraciones tridimensionales (3–D), en la actualidad se disponen de varios métodos de solución, entre ellos la integración de contorno [19–24].

En este trabajo, será utilizada la integración de contorno para obtener del factor de visión de las ocho geometrías analizadas. Para aproximar las funciones geometrías triangulares 31

el método RCB.

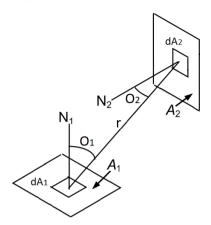


Figura 1. Geometría básica del factor de visión

especiales generadas en la integración, será utilizado 2.2. Generado de mallas para elementos de superficies

En la ingeniería moderna, en la generación de mallas unos de los elementos más utilizados son los triangulares. Contrariamente, los rectangulares o cuadrados son utilizados en muy pocas ocasiones, exceptuando los casos que la geometría global sea un cubo perfecto. La formulación de este tipo de geometrías requiere un tratamiento matemático complejo que incluye sumas de la cuádruple integral ecuación (1), causado por la variación de los límites en la proyección sobre cada eje coordenado. El factor de visión entre dos superficies rectangulares del mismo ancho, con borde común y ángulo θ incluido (véase la Figura 2), viene dado por la ecuación (2).

$$f_{(1)} = F_{a-b} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^L dy_1 \int_0^D dx \int_0^W dz \int_0^D \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dy_2$$
 (2)

Para evaluar la ecuación (2) son utilizadas las siguientes sustituciones (ecuación (3)).

Después de evaluar la ecuación (2) se obtiene la siguiente solución $f_{(1)}$ (ecuación (4)).

$$X = W/D; Y = L/D; R = \sqrt{X^2 + Y^2 - 2XY\cos\theta}$$
(3

$$f_{(1)} = \frac{1}{\pi Y} \left\{ \begin{aligned} -\frac{\sin 2\theta}{4} \left\{ Y^2 tan^{-1} \left(\frac{X}{Y} csc \ \theta - cot \ \theta \right) + X^2 tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} csc \ \theta - cot \ \theta \right) + XY sin \ \theta + \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \left(X^2 + Y^2 \right) \right\} + Y + \left(\frac{1}{4} ln \left\{ \left\{ \frac{X^2}{R^2} \left(\frac{1+X^2}{1+R^2} \right)^{\cos 2\theta} \right\} \right\} + \left(\frac{Y^2 + Y^2 R^2}{R^2 + Y^2 R^2} \right)^{Y^2 sin^2} \frac{2\theta}{2\theta} \left(\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+R^2} \right)^{\cos^2 \theta + 1} \right\} + \left(\sin^3 \theta \cos \theta \right) tan^{-1} \left(\frac{Y sin \ \theta \sqrt{X^2 + cot^2 \theta + 1}}{X^2 - YX cos \theta + 1} \right) \sqrt{X^4 + X^2 (cot^2 \theta + 1)} + X tan^{-1} \left(\frac{1}{X} \right) + \left(\frac{1}{Y} \right) - R cot^{-1} (R) + \frac{\sin 2\theta}{2} \int_0^Y \sqrt{Z^2 + cot^2 \theta + 1} \ tan^{-1} \left(\frac{X sin \ \theta \sqrt{z^2 + cot^2 \theta + 1}}{z^2 - zX cos \ \theta} + 1 \right) dz \right\} \right\} \right\}$$

$$(4)$$

En las ecuaciones (2), (3) y (4), el ángulo θ es dado en radianes. La ecuación (4) es muy compleja, por esta razón, la última integral no fue resuelta, dado que su solución puede ser obtenida numéricamente usando la regla de Simpson 1/3 (con ocho intervalos como mínimo).

En la Figura 3, mediante el trazado de líneas diagonales, la superficie emisora A_1 y receptora A_2 son divididas en ocho geometrías triangulares. Aplicando el álgebra de forma para la geometría generada en la Figura 3, son obtenidas $\frac{1}{2}n^{n-1}=\frac{1}{2}4^{4-1}=32$ combinaciones de factores de visión. La geometría analizada es simétrica, por tanto, es posible definir siete casos básicos (véase la Figura 4), los cuales serán:

Caso 1: Triángulo rectángulo a rectángulo, con lado común y ángulo θ entre ambas superficies.

Caso 2: Triángulo rectángulo a triángulo rectángulo, con lado común y ángulo θ entre ambas superficies: vértices en un punto común.

Caso 3: Triángulo rectángulo a triángulo rectángulo, con lado común y ángulo θ entre ambas superficies: vértices en extremos opuestos.

Caso 4: Triángulo isósceles a rectángulo, con lado común y ángulo θ entre ambas superficies.

Caso 5: Triángulo rectángulo a triángulo rectángulo de distinto tamaño, con ángulo θ entre ambas superficies: vértices en un punto común.

Caso 6: Triángulo rectángulo a triángulo rectángulo de distinto tamaño, con ángulo θ entre ambas superficies: vértices en extremos opuestos.

Caso 7: Triángulos rectángulos perpendiculares con un borde igual y dispuestos en dirección opuesta.

Los factores de visión para los restantes casos pueden ser obtenidos mediante la regla de sumas.

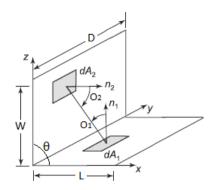


Figura 2. Rectángulos de igual ancho, con borde común y ángulo θ incluido

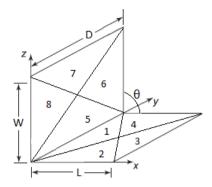


Figura 3. División de superficies rectangulares en elementos triangulares

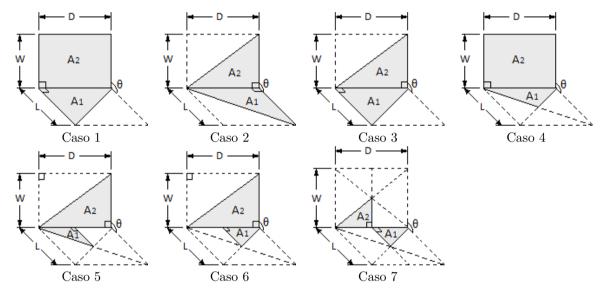


Figura 4. Configuraciones básicas para geometrías triangulares

2.3. Modelación del factor de visión. Caso 1

En el caso 1 (véase la Figura 5), se cumple la ecuación (5).

$$cos O_{1} = \frac{zsin \theta}{r}; cos O_{2} = \frac{xsin \theta}{r} r = (y_{1} - y_{1})^{2} + x^{2} + z^{2} - 2xzcos \theta$$
 (5)

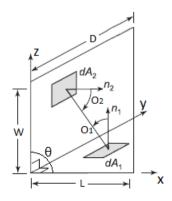


Figura 5. Geometría básica para el caso 1

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (1), el factor de visión F_{12} viene dado por la ecuación (6).

$$f_{2} = \frac{\sin^{2}\theta}{\pi A_{1}} \int_{0}^{L} dy_{1} \int_{0}^{y_{1D/L}} dx \int_{0}^{D} dz \cdot \int_{0}^{W} \frac{xz}{\{(y_{1} - y_{2})^{2} + x^{2} + z^{2} - 2xz\cos\theta\}^{2}} dy_{2}$$
 (6)

Para ejecutar la integración, en la ecuación (6) fue realizado el cambio indicado en la ecuación (7).

$$W = a; D = b; L = c \tag{7}$$

La ecuación (6) es integrada primero sobre la superficie emisora A_1 , obteniéndose una suma de integrales, la cual viene dada por la ecuación (8).

$$f_{2} = \frac{1}{\pi A_{1}} \int_{0}^{b} dy \int_{0}^{c} \left\{ tan^{-1} \left(\frac{1}{z} \right) + \frac{z sin^{2}}{2} \theta ln \left[\frac{z^{2} \left(z^{2} - 2azcos \theta + 1 + a^{2} \right)}{\left(1 + z^{2} \right) \left(a^{2} + z^{2} - 2azcos \theta \right)} \right] - zsin \theta cos \theta \left[\frac{\pi}{2} - \theta + tan^{-1} \left(\frac{a - zcos \theta}{z sin \theta} \right) \right] + cos \theta \sqrt{1 + z^{2} sin^{2} \theta} \left[tan^{-1} \left(\frac{a - zcos \theta}{\sqrt{1 + z^{2} sin^{2} \theta}} \right) + tan^{-1} \left(\frac{zcos \theta}{\sqrt{1 + z^{2} sin^{2} \theta}} \right) \right] + \frac{acos \theta - z}{\sqrt{a^{2} + z^{2} - 2azcos \theta}} tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{a^{2} + z^{2} - 2azcos \theta}} \right) \right\} dz$$
(8)

Después de un complejo proceso, en el que fue re- ecuación (8), cuya solución es proporcionada en la querido resolver $n^n = 4^4 = 256$ funciones primitivas, ecuación (9): es resuelta la suma de integrales dobles dada en la

$$f_{(2)} = 2f_{(1)} \left\{ \frac{a^{2}b^{2}}{8(a^{2}+b^{2})} ln \left(\frac{b^{2}+c^{2}}{(a^{2}+c^{2})^{2}} \right) + \frac{a^{2}b^{4}}{4(a^{2}+b^{2})^{2}} ln \left(\frac{b(a^{2}+c^{2})}{a(b^{2}+c^{2})} \right) + \frac{a^{4}b^{2}}{4(a^{2}+b^{2})^{2}} ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{a^{2}c^{2}}{8(a^{2}+b^{2})} ln \left(\frac{(b^{2}+c^{2})(a^{2}+b^{2}+c^{2})}{c^{2}(a^{2}+c^{2})} \right) + \frac{a^{2}b^{2}}{4(a^{2}+b^{2})^{2}} ln \left(\frac{(a^{2}+b^{2})(a^{2}+c^{2})}{(a^{2}+b^{2})(a^{2}+c^{2})} \right) + \frac{b^{2}}{8} ln \left(\frac{(a^{2}+b^{2})(a^{2}+c^{2})}{b^{2}(a^{2}+b^{2}+c^{2})} \right) + \frac{c^{2}}{8} ln \left(\frac{c^{2}(a^{2}+b^{2}+c^{2})}{(a^{2}+b^{2})(a^{2}+c^{2})} \right) + \frac{3}{4} ab \ tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{1}{2} bc \ tan^{-1} - \frac{1}{2} b\sqrt{a^{2}+c^{2}} tan^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{a^{2}+c^{2}}} \right) - \frac{a^{4}}{8(a^{2}+b^{2})} ln \left(a^{2}+c^{2} \right) + \frac{ab^{2}(2a-\pi b)}{8(a^{2}+b^{2})} + \frac{a^{2}b^{2} \left(\frac{b^{4}}{a^{2}+b^{2}}-b^{2}-c^{2} \right)}{2(a^{2}+b^{2})^{\frac{3}{2}} \sqrt{b^{2}+c^{2}-\frac{b^{4}}{a^{2}+b^{2}}}} tan^{-1} \left(\frac{(a^{2}+b^{2})^{\frac{3}{2}} \sqrt{b^{2}+c^{2}-\frac{b^{4}}{a^{2}+b^{2}}}}{(a^{2}+b^{2})^{\frac{3}{2}} \left(b^{2}+c^{2}-\frac{b^{4}}{a^{2}+b^{2}}-b^{2} \right) \left(a^{2}+b^{2} \right) - b^{2} \right\} \right) - \frac{1}{2} \int_{0}^{a} \left[\frac{bx^{2}}{a\sqrt{x^{2}+c}} tan^{-1} \left(\frac{a\sqrt{x^{2}+c}}{x^{2}+c^{2}+\frac{b^{2}}{a^{2}}(x^{2}-ax)} \right) + \frac{bx}{\sqrt{x^{2}+c}} tan^{-1} \left(\frac{\frac{b}{a}x-b}{\sqrt{x^{2}+c}} \right) \right] \right\} dx$$

$$(9)$$

En la ecuación (9), el término $f_{(1)}$ es obtenido del borde común b, quedando de la forma de la ecuación mediante la ecuación (4). Dada la complejidad de la ecuación (9), la última integral no es resuelta, obteniéndose su solución de forma numérica mediante la RMS (se recomiendan doce intervalos). La ecuación (9) es transformada a la ecuación (10).

$$F_{12} = f_{(n)} = 2F_{(1)} \cdot \varphi n \tag{10}$$

La ecuación (10) es posteriormente transformada, dividiendo cada variable dimensional por la longitud

(11).

$$1 = b/b; X = a/b; Y = c/b R = \sqrt{X^2 + Y^2 - 2XY\cos\theta}$$
 (11)

Aplicando en la ecuación (9) el cambio de variables declarado en la ecuación (11), es obtenida la solución analítica para el caso 1, la cual viene dada por la ecuación (12).

$$f_{(2)} = 2f_{(1)} \left\{ \frac{X^{2}}{8(X^{2}+1)} ln\left(\frac{Y^{2}+1}{R^{4}}\right) + \frac{X^{2}}{4(X^{2}+1)^{2}} ln\left(\frac{R^{2}}{X(Y^{2}+1)}\right) + \frac{X^{2}Y^{2}}{8(X^{2}+1)} ln\left(\frac{(Y^{2}+1)(R^{2}+1)}{Y^{2}R^{2}}\right) + \frac{X^{4}}{4(X^{2}+1)^{2}} ln\left(\frac{1}{X}\right) - \frac{X^{4}}{8(X^{2}+1)} ln\left(R^{2}\right) + \frac{3X}{4} tan^{-1}\left(\frac{1}{X}\right) + \frac{Y}{2} tan^{-1}\left(\frac{1}{Y}\right) - \frac{R}{2} tan^{-1}\left(\frac{1}{R}\right) + \frac{1}{8} ln\left\{ \left(\frac{X^{4}(R^{2}+1)^{2}}{R^{2}(X^{2}+1)^{2}}\right)^{X^{2}} \left(\frac{Y^{2}(R^{2}+1)}{R^{2}(X^{2}+1)}\right)^{Y^{2}} \left(\frac{R^{2}(X^{2}+1)}{R^{2}+1}\right) \right\} + \frac{2X^{2}-\pi}{8(X^{2}+1)} - \frac{X^{2}\left(Y^{2}-\frac{X^{2}+2}{X^{2}+1}\right)}{2(X^{2}+1)^{\frac{3}{2}}\sqrt{Y^{2}-\frac{X^{2}+2}{X^{2}-1}}} tan^{-1} \left(\frac{(X^{2}+1)^{\frac{3}{2}}\sqrt{Y^{2}-\frac{X^{2}+2}{X^{2}+1}}}{(X^{2}+1)(Y^{2}-\frac{X^{2}+2}{X^{2}+1})-X^{2}}\right) -$$

$$(12)$$

La ecuación (12) es una combinación de variables (Y;X) v su evaluación es una tarea compleja, al ser requeridos resolver polilogaritmos, sumas de series infinitas y funciones trigonométricas inversas. Sin embargo, mediante el método de raíces cruzadas de Bretzhtsov es posible obtener un resultado aproximado, lo cual simplificaría el cálculo del factor de visión.

Para implementar el método de raíces cruzadas, son construidos los nodos usando valores prefijados (Y; X), los cuales son unidos por medio de líneas diagonales formando las familias de curvas a_n y b_n . En este trabajo son usados los valores Y = (0.1; 0.2; 0.5; 1; 3; 10)Y X = (0.1; 0.3; 0.6; 1; 3; 6; 10).

En las Tablas 1 y 2 son resumidos la combinación de variables (Y; X) para cada nodo y los nodos que integran cada curva a_n y b_n , respectivamente, mientras en la Figura 6 son graficadas las familias de curvas a_n y b_n .

El siguiente paso es computar el factor de visión mediante la ecuación (12) para cada una de las combinaciones de variables (Y;X) dadas en la Tabla 1, graficándolos en un diagrama $F_{12};X$, (véase la Figura 7). La unión de los nodos a lo largo del eje x permite crear una tercera familia de curvas c_n . Una particularidad es que todos los nodos integrantes de una misma curva c_n le corresponden el mismo valor de la variable Y (véase la Tabla 1). En la Tabla 3 son resumidos los nodos que integran cada curva c_n .

Tabla 1. Combinaciones variables (Y; X) para cada nodo

nodo	(Y,X)	nodo	(Y,X)	nodo	(Y,X)	nodo	(Y, X)
1	3; 0.1	12	1; 0.6	23	0.5;1	34	0.5;6
2	10; 0.3	13	3;1	24	1; 3	35	1;10
3	1; 0.1	14	10;3	25	3;6	36	0.1 - 3
4	3; 0.3	15	0.1;0.1	26	10; 10	37	0.2;6
5	10; 0.6	16	0.2;0.3	27	0.1;0.6	38	0.5;10
6	0.5 ; 0.1	17	0.5;0.6	28	0.2;1	39	0.1;6
7	1; 0.3	18	1;1	29	0.5; 3	40	0.2;10
8	3;0.6	19	3; 3	30	1;6	41	10; 0.1
9	10;1	20	10;6	31	3;10	42	0.1;10
10	0.2;0.1	21	0.1;0.3	32	0.1;1		
11	0.5 ; 0.3	22	0.2 ; 0.6	33	0.2; 3		

Tabla 2. Nodos que integran cada curva a_n y b_n

$\mathbf{a_n}$	nodos	$\mathbf{b_n}$	nodos
a_1	1-2	b_1	10-21
a_2	3-4-5	b_2	6-16-27
a_3	6-7-8-9	b_3	3-11-22-32
a_4	10-11-12-13-14	b_4	1-7-17-28-36
a_5	15-16-17-18-19-20	b_5	41-4-12-23-33-39
a_6	21-22-23-24-25-26	b_6	2-8-18-29-37-42
a_7	27-28-29-30-31	b_7	5-13-24-34-40
a_8	32-33-34-35	b_8	9-19-30-38
a_9	36-37-38	b_9	14 - 25 - 35
a_{10}	39-40	b_{10}	20-31

Tabla 3. Nodos que integran cada curva c_n

$\mathbf{c_n}$	nodos	$\mathbf{c_n}$	nodos
c_1	15-21-27-32-36-39-42	c_4	3-7-12-18-24-30-35
c_2	10-16-22-28-33-37-40	c_5	1-4-8-13-19-25-31
c_3	6-11-17-2329-34-38	c_6	41-2-5-6-14-20-26

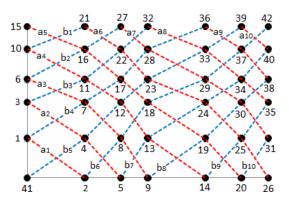


Figura 6. Familias de curvas a_n y b_n

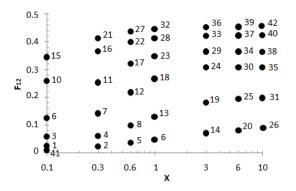


Figura 7. Esquema para aplicar las raíces cruzadas

Cada curva de las familias a_n , b_n , c_n es aproximada de forma individual mediante el método de mínimos cuadrados (MC), usando un polinomio de tercer grado en la forma $mX^3 + nX^2 + oX + p$, estableciendo así una dependencia entre el factor de visión F_{12} y la variable X. En la Figura 8 es dada la aplicación del método para las curvas a_5 , b_5 , c_4 .

En la Tabla 4 son resumidos los valores de las constantes m, n, o, p obtenidos en la implementación de MC a la totalidad de las curvas a_n , b_n , c_n . En cada curva, los valores m, n, +o, p son promediados, obteniéndose de esta forma las funciones aproximadas A_n , B_n , C_n .

Para cada curva, el ángulo aparente de transmisibilidad (véase la Figura 8) es dado por la ecuación (13)

$$\psi = tan^{-1} \left(\frac{X}{Y} \right) \tag{13}$$

Por tanto, la raíz cruzada de Bretzhtsov es dada por la ecuación (14).

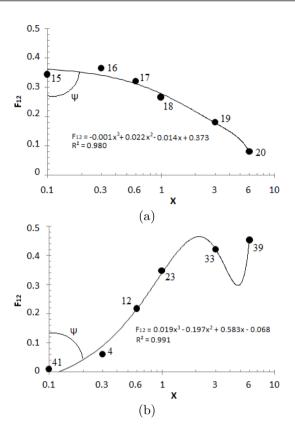
$$\varphi_n = A_n \psi^2 + B_n \psi + C_n \tag{14}$$

Las constantes m, n, o, p para los polinomios A_n , B_n , C_n son resumidos en la Tabla 4. Inicialmente para las aproximaciones fueron utilizadas las variables X, manteniendo constantes las variables Y por tanto, para aplicar las raíces cruzadas, se alternan las variables Y por X, obteniéndose las ecuaciones (15), (16) y (17) para los polinomios A_n , B_n , C_n .

$$A_n = -0.022Y^3 + 0.316Y^2 - 0.89Y + 0.5 \tag{15}$$

$$B_n = 0.056Y^3 - 0.783Y^2 + 2.23Y - 1.43 (16)$$

$$C_n = 0.03Y^3 + 0.407Y^2 - 1.07Y + 2.02 (17)$$



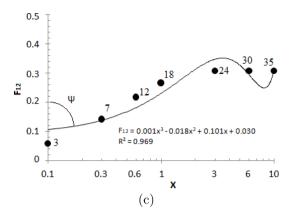


Figura 8. Aproximación mediante mínimos cuadrados: (a) curva a_5 , (b) curva b_5 , (c) curva c_4

Sustituyendo las ecuaciones (15), (16) y (17) en la ecuación (14), se obtiene que la raíz cruzada de Bretzhtsov para el caso 1 viene dada por la ecuación (18).

$$\varphi_n = \left(-0.022Y^3 + 0.316Y^2 - 0.89Y + 0.5\right)\psi^2 + \left(0.056Y^3 - 0.783Y^2 + 2.23Y - 1.43\right)\psi - \\ -0.03Y^3 + 0.407Y^2 - 1.07Y + 2.02\tag{18}$$

Tabla 4. Constantes $m,\; n,\; o,\; p$ obtenidas con el uso de MC

Curva	\mathbf{m}	\mathbf{n}	O	\mathbf{p}
a_2	0	0.186	-1.023	0.51
a_3	0.549	0.32	-0.528	0.91
a_4	-0.278	0.28	-0.88	0.352
a_5	-0.337	0.52	-0.514	0.373
a_6	-0.11	0.64	-2.48	0.484
a_7	0	0.66	-0.95	0.456
a_8	0	-0.03	-0.713	0.447
a_9	0	-0.05	-0.03	0.468
promedio A_n	-0.022	0.316	-0.89	0.5
Curva	m	n		
	111	11	О	\mathbf{p}
b_1	0	0	3.06	-1.181
b_1	0	0	3.06	-1.181
b_1 b_2	0	0 -1.96	3.06 2.97	-1.181 -1.53
Curva	m	n		

b_6	0.106	-1.91	3.22	-2.99
b_7	0.011	-0.75	2.37	-1.07
b_8	0	-0.93	2.29	-1.123
b_9	0	-0.31	1.19	-1.285
b_{10}	0	0	0.29	-0.94
promedio B_n	0.056	-0.783	2.23	-1.43
Curva	m	n	0	n
Cui va	111	11	U	p
$\frac{curva}{c_1}$	0	0.16	-1.69	2.374
-				
c_1	0	0.16	-1.69	2.374
c_1 c_2	0 0.018	0.16 0.28	-1.69 -1.103	2.374 2.307
$\begin{array}{c} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{array}$	0 0.018 0.02	0.16 0.28 0.34	-1.69 -1.103 -1.161	2.374 2.307 2.183

Sustituyendo la ecuación (18) en la (10) es obtenido el factor de visión para el caso 1, el cual viene dado por la ecuación (19).

0.407

2.02

-1.07

0.03

promedio C_n

$$f_{(2)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left(-0.022Y^3 + 0.316Y^2 - 0.89Y + 0.5 \right) \psi^2 + \left(0.056Y^3 - 0.783Y^2 + 2.23Y - 1.43 \right) \psi - \\ -0.03Y^3 + 0.407Y^2 - 1.07Y + 2.02 \end{array} \right\} \tag{19}$$

3. Resultados y discusión

Para el uso en la ingeniería práctica, la ecuación (19) es mucho más simple que la solución analítica (SA) dada con anterioridad en la ecuación (12). El porciento de desviación (error) es computado con respecto a la solución analítica y es obtenido mediante la ecuación (20) [25].

$$D_{\%} = 100 \cdot \frac{SA - Val}{SA} \tag{20}$$

Donde: $D_{\%}$ es el porciento de desviación, en %. SA es el factor de visión obtenido con la solución analítica. Val es el factor de visión obtenido mediante métodos aproximados.

Para calcular los valores de $D_{\%}$, son computados los factores de visión para todas las 42 combinaciones de variables (Y;X) dadas en la Tabla 1, utilizando la SA, la RMS con cinco intervalos y los factores de visión obtenidos con la RCB.

En la Figura 9 son graficados los valores $D_{\%}$ obtenidos con la ecuación (18) para los factores de visión calculados mediante RMS y RCB, ajustados en bandas de error de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$.

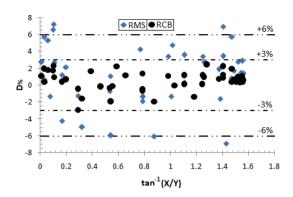


Figura 9. $D_{\%}$ obtenidos de la ecuación (18) para el caso 1

Para el caso 1, la Figura 9 muestra que las RCB proporcionan un mejor ajuste con respecto a la SA, con un error medio de ± 3 % en el 100 % de los puntos (Y;X) analizados. Contrariamente, los factores de visión obtenidos con RMS, brindan un menor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de ± 3 % y ± 6 % para el 54,8 % y 85,7 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.

3.1. Modelación y validación de los casos 2 al 7

Para los casos 2 al 7 (véase la Figura 4), matemáticamente el factor de visión F_{12} viene dado por las ecuaciones (21) a la (26).

Caso 2
$$f_{(3)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^L dy_1 \int_0^{y_1 D/L} dx \int_0^W dy_2 \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dz$$
 (21)

Caso 3
$$f_{(4)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^L dy_1 \int_0^{y_1 D/L} dx \int_0^W dy_2 \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dz$$
 (22)

Caso 4
$$f_{(5)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^{L/2} dy_1 \int_0^{y_1 D/L} dx \int_0^W dz \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dy_2$$
 (23)

Caso 5
$$f_{(6)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^{L/2} dy_1 \int_0^{y_1 D/L} dx \int_0^W dy_2 \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dz$$
 (24)

Caso 6
$$f_{(7)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^{L/2} dy_1 \int_{y_1 D/L}^0 dx \int_0^W dy_2 \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dz$$
 (25)

Caso 7
$$f_{(8)} = \frac{\sin^2 \theta}{\pi A_1} \int_0^{L/2} dy_1 \int_{-y_1 D/L}^0 dx \int_0^{W/2} dy_2 \int_0^{y_2 D/L} \frac{xz}{\{(y_1 - y_2)^2 + x^2 + z^2 - 2xz\cos\theta\}^2} dz$$
 (26)

Las soluciones analíticas de las ecuaciones (21) a la (26) son extremadamente extensas y complejas, al ser requerido el manejo de funciones de Spence, función gamma, sumas de polilogaritmos, funciones de Bessel modificadas de primera especie y órdenes cero, uno y dos, por esta razón, no serán presentadas acá.

Para la solución de las ecuaciones (21) a (26) se aplica el mismo procedimiento usado en el caso 1, obteniéndose para los casos 2 al 7 las siguientes aproximaciones para calcular el factor de visión.

$$Caso\ 2 \quad f_{(3)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ (-0.001Y^3 + 0.033Y^2 - 0.14Y + 0.265)\psi^2 + (0.011Y^3 - 0.177Y^2 + 0.7Y - 0.615)\psi - -0.01Y^3 + 0.142Y^2 - 0.475Y + 1.29 \right\}$$

$$(27)$$

$$Caso \ 3 \quad f_{(4)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ (-0.031Y^3 + 0.424Y^2 - 1.257Y + 1.1)\psi^2 + (0.071Y^3 - 0.975Y^2 + 2.92Y - 2.06)\psi - -0.034Y^3 + 0.462Y^2 - 1.268Y + 1.6 \right\}$$
 (28)

Caso 4
$$f_{(5)} = 2f_{(1)} \cdot \{(-0.01Y^2 + 0.24Y + 0.67)\psi^2 + (0.02Y^2 - 0.31Y - 2.2)\psi - 0.02Y^2 + 0.27Y + 3\}$$
(29)

$$Caso\ 5\quad f_{(6)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ (-0.02Y^3 + 0.29Y^2 - 1.1Y + 0.6)\psi^2 + (0.06Y^3 - 0.88Y^2 + 2.96Y - 4.41)\psi - -0.04Y^3 + 0.55Y^2 - 1.41Y + 1.87 \right\} \ (30)$$

$$Caso\ 6\quad f_{(7)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ (-0.011Y^3 + 0.12Y^2 - 0.025Y + 0.52)\psi^2 + (0.025Y^3 - 0.307Y^2 + 0.49Y - 1.64)\psi - \\ -0.134Y^3 + 0.183Y^2 - 0.35Y + 2.47 \right\}$$
 (31)

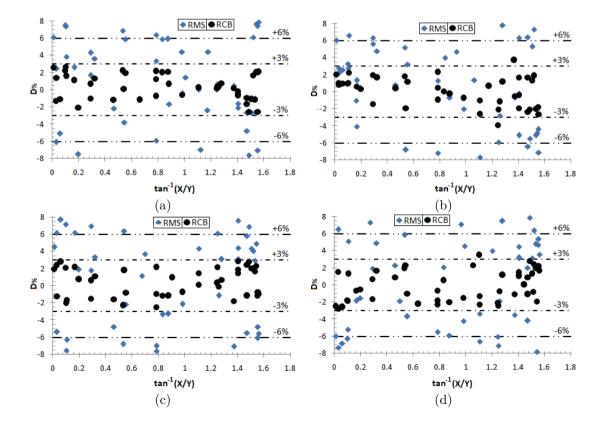
$$Caso\ 7 \quad f_{(8)} = 2f_{(1)} \cdot \left\{ (0.015^2 - 0.108Y + 0.08)\psi^2 + (-0.015Y^2 + 0.096Y + 0.048)\psi - -0.001Y^2 + 0.04Y + 0.058 \right\}$$
 (32)

En la Figura 10 son graficados en bandas de error de ± 3 % y ± 6 %, los $D_\%$ obtenidos con la ecuación (18) para los factores de visión calculados con RMS y RCB para los casos 2 al 7.

Para el caso 2, la Figura 10 muestra que las RCB brindan el mejor ajuste con respecto a la SA, con un error medio de ± 3 % en el 97.6 % de los puntos (Y;X) analizados. Contrariamente, los factores de visión obtenidos con RMS, producen un menor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de ± 3 %

y ±6 % en el 28,5 % y 64.3 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.

Para el caso 3, se comprueba en la Figura 10 que las RCB brindan un mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 92.9 % y 100 % de los puntos (Y;X) analizados, mientras que los factores de visión obtenidos con RMS proporcionan un menor ajuste con respecto a la SA, computando errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 38.1 % y 69.0 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.



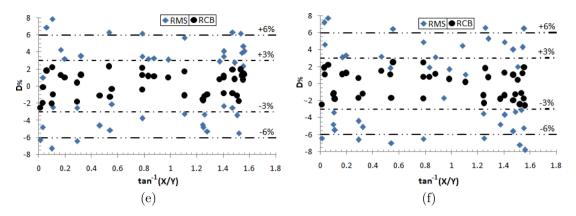


Figura 10. Valores $D_{\%}$ obtenidos con la ecuación (18) para los casos analizados. (a) Caso 2; (b) Caso 3; (c) Caso 4; (d) Caso 5; (e) Caso 6; (f) Caso 7

Para el caso 4, la Figura 10 muestra que las RCB proporcionan un mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 90.5 % y 100 % de los puntos (Y;X) analizados. Contrariamente, los factores de visión obtenidos con RMS, brindan un menor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 21.4 % y 61.9 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.

Para el caso 5, se comprueba en la Figura 10 que las RCB brindan un mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 95.2 % y 100 % de los puntos (Y;X) analizados, mientras que los factores de visión obtenidos con RMS proporcionan un menor ajuste con respecto a la SA, computando errores medios de $\pm 3~\%$ y $\pm 6~\%$ en el 26.2 % y 71.4 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.

Para el caso 6, la Figura 10 muestra que las RCB proporcionan un mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de ± 3 % en el 100 % de los puntos (Y;X) analizados. Contrariamente, los factores de visión obtenidos con RMS, brindan un menor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de ± 3 %

y ±6 % en el 31.0 % y 81.0 % de los puntos (Y; X) evaluados, respectivamente.

Para el caso 7, se comprueba en la Figura 10 que las RCB brindan un mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de ± 3 % en el 100 % de los puntos (Y;X) analizados, mientras que los factores de visión obtenidos con RMS proporcionan un menor ajuste con respecto a la SA, computando errores medios de ± 3 % y ± 6 % en el 23.8 % y 73.8 % de los puntos (Y;X) evaluados, respectivamente.

3.2. Otras configuraciones geométricas

En la Figura 3, las superficies emisora y receptora son divididas en cuatro superficies triangulares, entonces son posibles $0.5n^{n-1}=0.5\cdot 4^{4-1}=32$ combinaciones (véase la Figura 11). Mediante los factores de visión $f_{(1)}$ al $f_{(8)}$ es posible obtener los factores de visión para las restantes configuraciones, aplicando la regla de sumas y el álgebra de factores de forma. En la Tabla 5 son resumidas las relaciones para computar el factor de visión en las configuraciones dadas en la Figura 11.

OD 11	_	C C ./	1	C i	1	/		c· ·	1
Tabla	5 .	Configuración	de	tactores	de	vision	para su	perficies	triangulares

Caso	$\mathbf{F_{(1-2)}\cdots f_{(n)}}$	Caso	$\mathbf{F_{(1-2)}\cdots f_{(n)}}$
Caso 8	$f_{(9)} = f_{(5)}$	Caso 20	$f_{(21)} = 3f_{(3)} + f_{(8)} - 2f_{(6)} - 2f_{(7)}$
Caso 9	$f_{(10)} = f_{(5)}$	Caso 21	$f_{(22)} = 4f_{(1)} + 3f_{(6)} + 3f_{(7)} - 3f_{(3)} - 2f_{(4)} - 4f_{(5)} - f_{(8)}$
Caso 10	$f_{(11)} = 2f_{(1)} - f_{(2)}$	Caso 22	$f_{(23)} = 4\dot{f}_{(5)} + f_{(3)} + f_{(8)} - 2f_{(6)} - 2f_{(7)}$
Caso 11	$f_{(12)} = f_{(6)} + f_{(7)}$	Caso 23	$f_{(24)} = 5f_{(3)} + 4f_{(4)} + 5f_{(5)} + f_{(8)} - 4f_{(1)} - 4f_{(2)} - 4f_{(6)} - 4f_{(7)}$
Caso 12	$f_{(13)} = 2\dot{f}_{(2)} - \dot{f}_{(5)}$	Caso 24	$f_{(25)} = 2f_{(1)} + f_{(4)} - 2f_{(2)}$
Caso 13	$f_{(14)} = 4f_{(1)} + f_{(5)} - 4f_{(2)}$	Caso 25	$f_{(26)} = 2f_{(1)} + f_{(3)} - 2f_{(2)}$
Caso 14	$\hat{f}_{(15)} = 2\hat{f}_{(4)} - \hat{f}_{(6)} - \hat{f}_{(7)}$	Caso 26	$f_{(27)} = f_{(2)} - f_{(3)}$
Caso 15	$f_{(16)} = 4f_{(1)} + f_{(6)} + f_{(7)} - 2f_{(3)} - 2f_{(4)}$	Caso 27	$f_{(28)} = f_{(2)} - f_{(4)}$
Caso 16	$f_{(17)} = 2f_{(3)} - f_{(6)} - f_{(7)}$	Caso 28	$f_{(29)} = f_{(5)} - f_{(6)} - f_{(7)}$
Caso 17	$f_{(18)} = f_{(3)} + f_{(8)}$	Caso 29	$f_{(30)} = 2f_{(3)} + 2f_{(4)} + f_{(5)} - 4f_{(2)} - f_{(6)} - f_{(7)}$
Caso 18	$f_{(19)} = f_{(6)} + f_{(7)} - f_{(3)} - f_{(8)}$	Caso 30	$f_{(31)} = 2f_{(2)} + f_{(6)} + f_{(7)} - f_{(5)} - 2f_{(4)}$
Caso 19	$f_{(20)} = 4f_{(5)} + f_{(3)} + f_{(8)} - 2f_{(6)} - 2f_{(7)}$	Caso 31	$\hat{f}_{(32)} = 2\hat{f}_{(2)} + \hat{f}_{(6)} + \hat{f}_{(7)} - \hat{f}_{(5)} - 2\hat{f}_{(3)}$

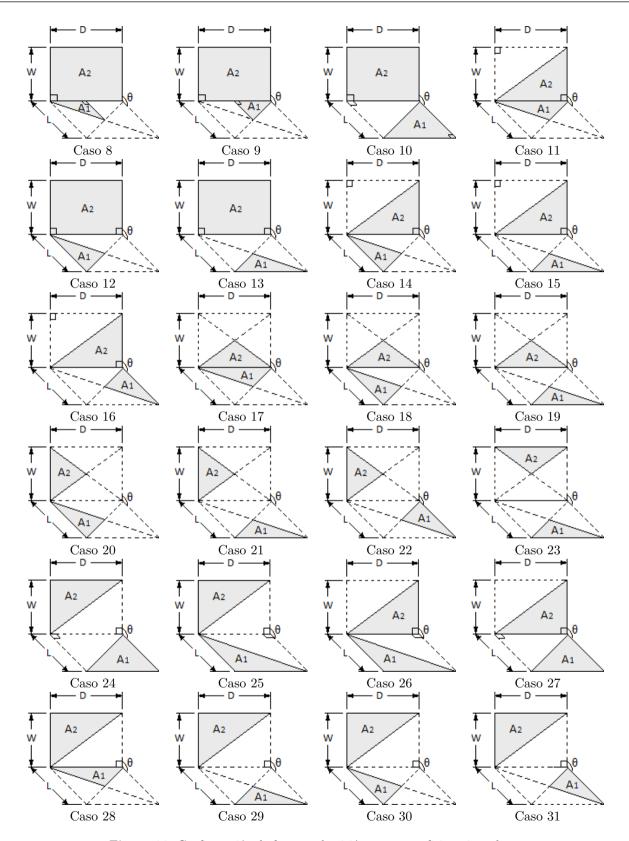


Figura 11. Configuración de factores de visión para superficies triangulares

4. Conclusiones

Fue desarrollado un método aproximado para la determinación del factor de visión en 32 combinaciones de geometrías triangulares con bordes comunes y ángulo θ incluido, situadas en un espacio 3–D.

Para la validación de los modelos propuestos fueron evaluados 42 ejemplos con varias relaciones de aspecto para cada geometría de los ocho casos básicos, comparando los resultados obtenidos mediante la SA, con los arrojados por la RMS con cinco intervalos y los computados por el método propuesto con RCB.

En todos los casos evaluados, la RCB mostró los mejores ajustes, con un error de ± 6 % en más del 90 % de las muestras, mientras que la RMS mostró una dispersión media de ± 6 % en el 65 % de los datos. Este elemento confirma la validez de la hipótesis sobre su uso. Para las restantes 24 configuraciones geométricas estudiadas fueron presentadas las relaciones básicas para el cálculo del factor de visión a partir las expresiones obtenidas para los ocho casos básicos. La naturaleza práctica de la contribución y los valores razonables de ajustes obtenidos, permiten considerar a la propuesta como una herramienta adecuada para su uso en la ingeniería térmica y en las tareas de cálculo de la transferencia de calor por radiación.

Dada la ausencia de antecedentes similares en la literatura, el método propuesto refuerza el valor científico y práctico de esta investigación, pudiendo ser incorporadas las soluciones proporcionadas a los catálogos disponibles en la actualidad, para el cálculo de los factores de visión.

Agradecimientos

El autor muestra su agradecimiento por la ayuda y recomendaciones recibidas del profesor Dr. John R. Howell, del Departamento de Ingeniería Mecánica de Universidad de Texas en Austin, y al profesor Dr. Jack H. Lewis, Departamento de Matemáticas del Instituto Tecnológico de Massachusetts, EUA.

Referencias

- [1] J. R. Howell and M. P. Mengüç, "Radiative transfer configuration factor catalog: A listing of relations for common geometries," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 112, no. 5, pp. 910–912, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.10.002
- [2] Y. F. Nassar, "Analytical-numerical computation of view factor for several arrangements of two rectangular surfaces with non-common edge," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 159, p. 120130, 2020.

- [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120130
- [3] M. F. Modest and S. Mazumder, "Chapter 4 View factors," in *Radiative Heat Transfer (Fourth Edition)*, fourth edition ed., M. F. Modest and S. Mazumder, Eds. Academic Press, 2022, pp. 127–159. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818143-0.00012-2
- [4] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, "Analytical view factor solution for radiant heat transfer between two arbitrary rectangular surfaces," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, pp. 14999–15016, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10973-022-11646-4
- Y. Camaraza Medina, Introducción a la termotransferencia. Editorial Universitaria (Cuba), 2020. [Online]. Available: https://bit.ly/44PcgsO
- [6] J. R. Howell, A Catalog of Radiation Configuration Factors. McGraw-Hill, 1982. [Online]. Available: https://bit.ly/42qHzIJ
- [7] J. R. Howell, M. Pinar Menguc, and R. Siegel, Thermal Radiation Heat Transfer. CRC Press, 2010. [Online]. Available: https://bit.ly/42u9jfy
- [8] M. K. Gupta, K. J. Bumtariya, H. Shukla, P. Patel, and Z. Khan, "Methods for evaluation of radiation view factor: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 1236–1243, 2017, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016). [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.143
- [9] A. Narayanaswamy, "An analytic expression for radiation view factor between two arbitrarily oriented planar polygons," *International Journal* of Heat and Mass Transfer, vol. 91, pp. 841–847, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/ j.ijheatmasstransfer.2015.07.131
- [10] A. Narayanaswamy and P. Meyappan, "An analytic expression for radiation view factors between two planar triangles with arbitrary orientations," in Proceedings of CHT-15. 6th International Symposium on ADVANCES IN COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER, 12 2015, pp. 1545–1550. [Online]. Available: https://doi.org/10.1615/ICHMT. 2015.IntSympAdvComputHeatTransf.1500
- [11] R. Sudharshan Reddy, D. Arepally, and A. Datta, "View factor computation and radiation energy analysis in baking oven with obstructions: Analytical and numerical method," Journal of Food Process Engineering,

geometrías triangulares 41

- vol. 46, p. e14270, 01 2023. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.14270
- [12] Y. Zhou, R. Duan, X. Zhu, J. Wu, J. Ma, X. Li, and Q. Wang, "An improved model to calculate radiative heat transfer in hot combustion gases," Combustion Theory and Modelling, vol. 24, no. 5, pp. 829–851, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/13647830.2020.1769866 https://doi.org/10.1080/13647830.2020.1769866
- [13] X.-J. Yi, L.-Y. Zhong, T.-B. Wang, W.-X. Liu, D.-J. Zhang, T.-B. Yu, Q.-H. Liao, and N.-H. Liu, "Near-field radiative heat transfer between hyperbolic metasurfaces based on black phosphorus," *The European Physical Journal B*, vol. 92, no. 9, p. 217, Sep 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1140/epjb/e2019-100274-y
- [14] J. R. Ehlert and T. F. Smith, "View factors for perpendicular and parallel rectangular plates," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 7, no. 1, pp. 173–175, 1993. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/3.11587
- [15] C. K. Krishnaprakas, "View factor between inclined rectangles," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 11, no. 3, pp. 480–481, 1997. [Online]. Available: https://doi.org/10.2514/2.6267
- [16] H. J. Sauer Jr., "Configuration factors for radiant energy interchange with triangular areas," ASHRAE Transactions, vol. 80, no. 2, pp. 268–279, 1974. [Online]. Available: https://bit.ly/3I0jXm0
- [17] Y. Camaraza-Medina, A. A. Sánchez Escalona, O. M. Cruz-Fonticiella, and O. F. García-Morales, "Method for heat transfer calculation on fluid flow in single-phase inside rough pipes," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 14, p. 100436, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100436
- [18] W. Boeke and L. Wall, "Radiative exchange factors in rectangular spaces for the determination of mean radiant temperatures," *Building services engineering*, vol. 43, pp. 244–253, 1976.
- [19] F. F. Sönmez, H. Ziar, O. Isabella, and M. Zeman, "Fast and accurate ray-casting-based view

- factor estimation method for complex geometries," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 200, p. 109934, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109934
- [20] S. Francisco, A. Raimundo, A. Gaspar, A. V. Oliveira, and D. Quintela, "Calculation of view factors for complex geometries using Stokes' theorem," Journal of Building Performance Simulation, vol. 7, pp. 203–216, 05 2014. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2013.808266
- [21] S.-A. Biehs, R. Messina, P. S. Venkataram, A. W. Rodríguez, J. C. Cuevas, and P. Ben-Abdallah, "Near-field radiative heat transfer in many-body systems," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 93, p. 025009, Jun 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025009
- [22] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, "Experimental study on influence of the temperature and composition in the steels thermo physical properties for heat transfer applications," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 147, no. 21, pp. 11805–11821, Nov 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10973-022-11410-8
- [23] M. Lakhi and A. Safavinejad, "Numerical investigation of combined force convective-radiative heat transfer in a horizontal channel with Lattice Boltzmann method," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 146, no. 4, pp. 1911–1922, Nov 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10973-020-10136-9
- [24] M. Bonnici, P. Mollicone, M. Fenech, and M. A. Azzopardi, "Analytical and numerical models for thermal related design of a new pico-satellite," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, p. 113908, 2019. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113908
- [25] Y. Camaraza-Medina, "Methods for the determination of the heat transfer coefficient in air cooled condenser used at biomass power plants," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 39, no. 5, pp. 1443–1450, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.18280/ijht.390505





Propuesta metodológica para el diseño y análisis de un monocasco Formula Student

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE DESIGN AND ANALYSIS OF A FORMULA SAE MONOCOQUE

Rafael Wilmer Contreras Urgilés^{1,*}, Carlos Ayrton Jaramillo Andrade¹, Erick Josué Pizarro Barrera¹

Recibido: 11-04-2021, Recibido tras revisión: 19-04-2023, Aceptado: 05-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

En el presente documento se realiza la explicación de la metodología utilizada para el diseño de un monocasco Formula Student basado en el reglamento del año 2020. Los valores obtenidos del modelado mediante software CAD (diseño asistido por computador) y el análisis por MEF (método de elementos finitos) sirven de base para este estudio. Los valores de masa, centro de gravedad y la geometría son los seleccionados, ya que aportan una mayor información, lo que ayuda a determinar puntos de optimización en el proceso de diseño. En el análisis MEF se determina los esfuerzos admisibles por el monocasco y que se encuentran dentro de los parámetros de seguridad, siendo el factor de seguridad mínimo admisible de 1,1. Del modelo obtenido se desarrolla dos laminados CFRP (laminado de fibra de carbono y resina epoxi) de los cuales el primero da un resultado de peso simulado de 38 kg, y la segunda configuración de laminado un resultado de 20 kg. Se somete el modelo con menor peso al análisis de esfuerzos, los resultados obtenidos son superiores a un chasis tubular, se toma como referencia un modelo monoplaza eléctrico del 2017.

Palabras clave: monocasco, MEF, FSAE, centro de gravedad, CFRP, AEF

Abstract

This paper explains the methodology employed to design a Formula Student monocoque based on the regulations set forth in 2020. The values obtained from CAD (Computer Aided Design) modeling and FEM (Finite Element Method) analysis are the pillars of this study. The values of mass, center of gravity, and geometry have been specifically selected because they provide crucial information that aids in the identification of optimization points during the design process. The FEM analysis establishes the allowable stresses for the monocogue within the safety parameters, with a minimum admissible safety factor of 1.1. Two CFRP laminates (Carbon Fiber Laminate and Epoxy Resin Laminate) are developed from the model obtained. The first one yields a simulated weight of 38 kg, and the second one a weight of 20 kg. A stress analysis was performed on the lighter-weight model, obtaining results superior to those of a tubular chassis. A 2017 electric single-seater model is taken as a reference.

Keywords: Monocoque, FEM, FSAE, center of gravity, CFRP, AEF

Forma sugerida de citación: Contreras Urgilés, R. W.; Jaramillo Andrade, C. A. y Pizarro Barrera, E. J. "Propuesta metodológica para el diseño y análisis de un monocasco Formula Student," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 42-53, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.04.

¹,*Ingenieria Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia

:: rcontreras@ups.edu.ec.

1. Introducción

El monocasco es una estructura que permite aligerar en gran medida el peso de un vehículo. Este tipo de chasis es utilizado en competencias de la máxima categoría automovilística, la Fórmula 1, y sus subcategorías, Le Mans e Indycar. Para las pruebas de Fórmula 3, establecidas por la Federación Internacional de Automovilismo (FIA), la estructura del monocasco se diseña para superar pruebas estáticas que se consideran la referencia de integridad estructural deseada para un monocasco con relación al material compuesto [1].

Los materiales comúnmente utilizados en la producción de monocascos están compuestos principalmente por polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) [2] y paneles de Honeycomb [3], que presentan gran resistencia a la torsión y esfuerzos en función de su peso y los mismos se pueden formar casi en cualquier geometría. Su aplicación se ha demostrado en la investigación de Ashby [4], donde la propuesta metodológica con panel de sándwich compuesto de tres elementos principales, un núcleo, una matriz y la fibra de carbono fueron simuladas. Con respecto a la fibra de carbono, esta ha sido estudiada, en diferentes orientaciones y combinaciones en el plano [5]. Donde las combinaciones entre grados han permitido obtener las propiedades mecánicas deseadas en diferentes sentidos y orientación. Para el caso del Honeycomb en el trabajo de Eurenius et al. [6], indican que un patrón simétrico hexagonal de esta estructura, provee propiedades relativamente altas a la compresión y resistencia a la rotura, combinadas con baja densidad.

La desventaja de estos materiales son sus altos costos y procesos complejos de manufactura. Para el inicio del diseño se toma en cuenta las geometrías, por ejemplo, el Politecnico di Torino ha analizado diferentes tipos de modelos [7,8], siendo este un parámetro muy importante para optimizar el peso del monocasco [9]. Con esta base se obtuvo un modelo CAD que cumple con todos los requisitos geométricos del reglamento FSAE [10,11]. En la línea de fabricación de chasises, en el trabajo de [12], se ha aplicado la metodología de diseño, análisis y posterior fabricación; los autores han comprobado su fiabilidad en pruebas dinámicas.

En este trabajo se toman en cuenta la geometría y aerodinámica para aprovechar la forma del monocasco en favor de disminuir elementos adicionales que aumenten peso [13]. Otro parámetro de importancia es la aplicación del laminado CFRP como un punto de optimización, ya que diferentes laminados dan como resultado final una reducción del peso general del vehículo. Las direcciones de las fibras, de igual manera, sirven para reforzar ciertos esfuerzos a los que está sometida la estructura [14]. Esta innovación en materiales y procesos de manufactura, permite la optimización y mejora de rendimiento en la competición automovilística [15]. Los resultados de un buen laminado y una

buena selección de materiales permiten tener un modelo MEF, que con el peso reducido pueda soportar los esfuerzos mínimos requeridos por la competición [16].

Un software aplicado para modelos MEF ha sido estudiado por Zhao [17], el cual ha obtenido resultados positivos de predicción de comportamientos globales de la estructura de su modelo. Con respecto al mallado del modelo, se ha seleccionado un tamaño de elemento que permita construir un modelo matemático preciso para el análisis de esfuerzos. Los esfuerzos que se aplican sobre la estructura son rigidez torsional, rigidez longitudinal, análisis de impacto lateral, entre los más importantes [8]. Los resultados de peso que se esperan optimizar son alrededor del 50 % tomando en cuenta el diseño del monocasco de los equipos Squadra Corse Polito [7] y el diseño de la Universidad de Sevilla [18], con esto se consigue un modelo más eficiente en cuanto a reducción de peso y estructuralmente más resistente ante los esfuerzos aplicados a este tipo de vehículos.

2. Materiales y métodos

En esta sección se desarrollan los temas relacionados con la selección de materiales, configuración principal del panel y los parámetros para el desarrollo del diseño, luego se describen los resultados obtenidos de la simulación de esfuerzos.

2.1. Metodología

Luego de realizar un análisis del estado del arte se elabora un flujograma en el cual se establece el orden y las actividades que conciernen al diseño, análisis estructural y optimización del peso del modelo.

En la primera etapa se revisa la reglamentación de FSAE para extraer los parámetros más influyentes sobre el diseño y restricciones del monocasco [11]. En la segunda etapa se diseña el modelo tomando en cuenta las restricciones previas del reglamento [12].

Con el modelo completo en la Figura 1, en la etapa 3 se procede al laminado CFRP en el que se establece el espesor que tendrá el modelo final, el laminado va a depender de la sección en la que se trabaja, ya que cada sección tiene un espesor diferente por los esfuerzos que soportará cada zona.

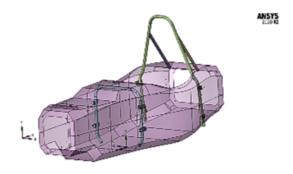


Figura 1. Modelo final en superficies

Lo referente a los análisis de resultados se detallará en la siguiente sección que corresponde al desarrollo de la metodología planteada.

2.2. Materiales

Los materiales a utilizar en el análisis son refuerzos de tela de fibra de carbono en una estructura de sándwich, Figura 2, con Honeycomb. La unión de diferentes materiales se conoce como materiales compuestos, proveen de una gran resistencia mecánica a esfuerzos y una muy buena disipación de esfuerzos a través de la estructura. Este panel de sándwich se compone de tres componentes principales, un núcleo, una matriz y las fibras que en este caso son de fibra de carbono [4].

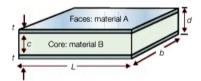


Figura 2. Típica estructura de sándwich [4]

2.2.1. Fibras

Los elementos hechos de materiales compuestos de fibra, se pueden diseñar para cada caso de carga, por lo que el material se crea de acuerdo con los requisitos estáticos requeridos. Existe la opción de elegir las direcciones en las que se colocarán las fibras. Apilar láminas de fibra de carbono con diferentes direcciones, le da al material las propiedades deseadas en cualquier dirección. Las orientaciones que se le dará a las fibras en el plano serían de 0°, 90° y ± 45 ° [5].

En la Figura 3 se puede ver que la fibra de Kevlar es la más resistente, mientras que la fibra de carbono es la más rígida. La fibra de vidrio es la menos resistente

y menos rígida, pero a su vez es la más económica de las tres.

El uso de estos materiales en competición ofrece una gran ventaja en términos de peso total. Es posible realizar una estructura con una rigidez similar a la de una estructura metálica convencional e incluso reducir su peso a la mitad. Por ello, su uso en equipos que buscan buenos resultados es fundamental [5].

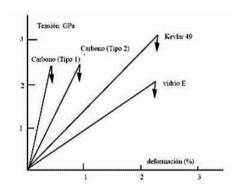


Figura 3. Diagrama tensión-deformación de fibras [5]

2.2.2. Matriz

La matriz es el material que soporta todas las fibras y representa su unión. Las fibras se impregnan en la matriz y forman un solo material.

Actualmente, se utilizan dos tipos principales de resinas para la matriz, epoxi y poliéster. Ambas son térmicamente estables, lo que significa que no se derretirán con el calor, simplemente pierden ciertas propiedades de rigidez. Otra propiedad es que su comportamiento estructural es isótropo, esto quiere decir que tiene las mismas propiedades físicas en todas las direcciones. Para el presente proyecto se aplicó una resina epoxi.

En la Tabla 1 se referencian algunas propiedades de las resinas.

Tabla 1.	Propiedades	de resinas	$\lfloor 5 \rfloor$	
----------	-------------	------------	---------------------	--

Propiedad	Unidades	Resinas epoxi	Resinas poliéster
Densidad	${ m Mg}~m^{-3}$	1.1–1.4	1.2-1.5
Módulo de Young	GPa	3-6	2-4.5
Coef. Poisson		0.38 – 0.4	0.37 – 0.39
Resist. tracción	MPa	35-100	40-90
Resist. compresión	MPa	100-200	90-250
Alarg. rotura (tracción)	%	1-6	2
Conduct. térmica	$Wm^{-1} C^{-1}$	0.1	0.2
Coef. dilatación	$10^{-6} {}^{\circ}C^{-1}$	60	100-200
Temp. distorsión	$^{\circ}\mathrm{C}$	50-300	50-110
Contracción curado	%	1-2	4-8
Absor. de agua (24 h a 20 °C)	%	0.1-0.4	0.1-0.3

2.2.3. Núcleo de Honeycomb

Hay diferentes tipos de núcleos de material de Honeycomb. Cada tipo tiene diferentes propiedades dependiendo del material del que sean fabricados; los más comunes son hechos de aluminio, papel de aramida (Nomex), acero, fibra de vidrio, carbón o cerámica [14]. El núcleo de Honeycomb consiste en un patrón simétrico hexagonal como se ve en la Figura 4, esta estructura provee propiedades relativamente altas a la compresión y resistencia a la rotura, combinadas con baja densidad [6].

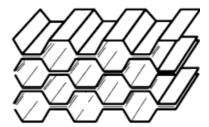


Figura 4. Estructura con celdas hexagonales [6]

En este estudio, para el núcleo se selecciona Honeycomb de aluminio que presenta una gran propiedad de absorción de energía, el espesor de este núcleo es de 20 mm.

3. Resultados y discusión

En el desarrollo del proyecto se plantean objetivos de peso y optimización. Para obtener una base teórica se inicia a partir del flujograma planteado en la Figura 5, para el hallar el modelo final [15].

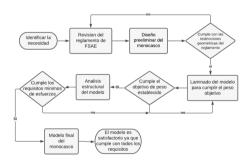


Figura 5. Proceso de diseño monocasco

3.1. Determinación del modelo CAD

El diseño del modelo parte de las regulaciones del percentil masculino 95, las cuales se detallan a continuación.

Partiendo de una buena posición vertical y horizontal del volante, el ángulo del asiento, la posición de los pedales, las barras de seguridad, buscando la comodidad para el piloto [9]. En la Figura 6 se muestra

la plantilla del percentil 95 masculino. Los valores de distancias se detallan en el reglamento FSAE [11].

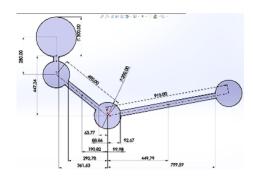


Figura 6. Plantilla del percentil 95 masculino [15]

Una vez determinados los percentiles y las dimensiones mínimas de la apertura de la cabina y la sección mínima transversal, se ha realizado el primer dimensionamiento, en el que se basa el diseño del monocasco. La Figura 7 muestra las aperturas transversal y de la cabina.

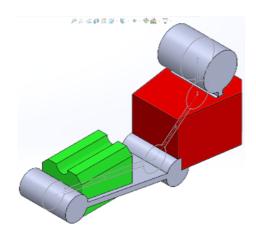


Figura 7. Sólido de apertura de la sección transversal interna en perspectiva isométrica [15]

Las medidas de estas secciones se encuentran detalladas a continuación:

Apertura de la cabina (Figura 8)

- Está 320 mm por encima del punto más bajo de la superficie superior del piso para el diseño del monocasco.
- 400 mm en su ancho frontal.
- 350 mm en su ancho posterior.
- 600 mm de largo mínimo de la cabina.

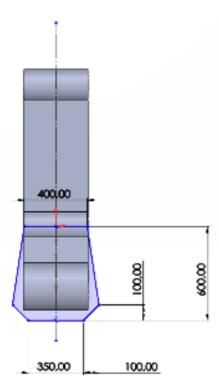


Figura 8. Dimensiones de la apertura de la cabina [15]

Sección transversal interna (Figura 9)

- Se debe mantener una sección transversal interna libre para permitir el paso de la plantilla que, a continuación, se muestra a través de la cabina.
- Un largo y ancho mínimo de 350 mm.
- Un radio de 50 mm en los centros superior e inferior.

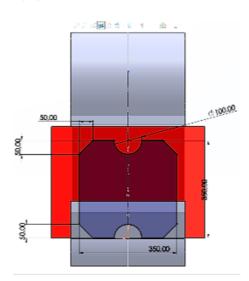


Figura 9. Dimensiones de la sección transversal interna [15]

Con estas medidas se desarrolla un modelo con los elementos principales que se encuentran en el monocasco, dichos elementos son la batería que se halla en

la parte posterior, un inversor debajo de las piernas del piloto y un par de cortafuegos. En la Figura 10 se observa el boceto lateral principal.

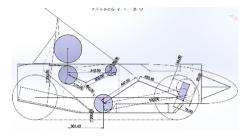


Figura 10. Disposición de elementos y boceto lateral [15]

De este boceto nace el modelo CAD, donde se colocan los puntos de sujeción de algunos elementos en el monocasco; el diseño final se ve en la Figura 11.

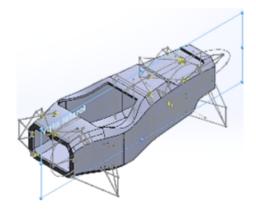


Figura 11. Diseño final del monocasco [15]

Con el modelo final, se obtiene el centro de gravedad y esfuerzos que se detallan a continuación.

3.2. Determinación del centro de gravedad

En esta sección, se aplican los pesos sobre el monocasco en el software. Posterior a esto, se realiza un ensamble con los componentes más representativos que se seleccionaron para el cálculo y listados en la Tabla 2. Con la herramienta de propiedades físicas, se localiza la posición del centro de gravedad del prototipo ensamblado visto en la Figura 12.

Tabla 2. Masas aproximadas del vehículo [10]

Componentes	Masa (kg)	%
Piloto	70	42.85
Batería	36	20.57
Inversor	7	4
Caja de pedales	4.5	2.57
Dirección	12.5	7.15
Monocasco	20	11.43
Otros componentes	20	11.43
Total	175	100

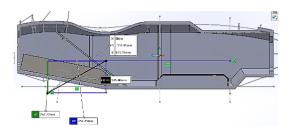


Figura 12. Ubicación del centro de gravedad [15]

3.3. Transferencia de masa lateral

Para desarrollar este cálculo, se tiene en cuenta el vehículo describe una curva que actúa sobre el centro de gravedad con una aceleración centrífuga equivalente a 4 G. La Figura 13 describe el diagrama de cuerpo libre en el que se definen el centro de gravedad y la dirección de las cargas.

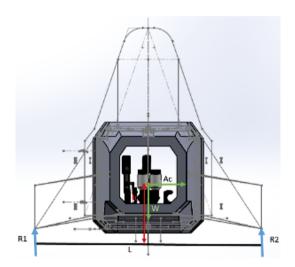


Figura 13. Diagrama de cuerpo libre [15]

La reacción R2 es la carga que interviene en la rigidez torsional, este torque se aplica en direcciones opuestas en ambos lados del eje delantero, para la simulación se utilizó un valor de 6870 N para simular una carga mayor en el monocasco y demostrar la dureza del material [11].

3.4. Transferencia de masa longitudinal y de frenado

Esta es la transferencia de masa longitudinal en la dirección de los neumáticos delanteros, que resulta de las fuerzas de frenado. La Figura 14 muestra el diagrama de cuerpo libre para este esfuerzo.

La velocidad máxima, el coeficiente de fricción entre los neumáticos y el asfalto, la posición del centro de gravedad, el tiempo de frenado y el peso del vehículo, se determinan como condiciones de iniciales.

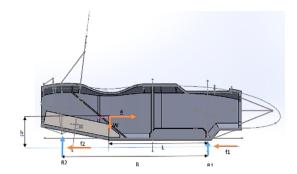


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre longitudinal [15]

Las cargas calculadas $R1=1423.85\ N$ y $f1=1181.79\ N$ involucradas en el estudio de las pruebas de resistencia longitudinal y de frenado; se toman como referencia, sin embargo, en la simulación, todos los valores se incrementan, con el fin de tensionar aún más el modelo.

3.5. Caso de impacto lateral

Inicialmente, se supone que la velocidad del vehículo es de 40 km/h, teniendo en cuenta el peor de los casos y aplicando una fuerza de 4.5 G en el impacto. Para el cálculo se utiliza un peso del vehículo de 220 kg y un peso del conductor de 75 kg [15]. Al aplicar la fórmula de velocidad final, con una velocidad final de 11.11 m/s, que equivale a una velocidad inicial que parte del reposo, más la multiplicación de la aceleración, en este caso siendo el dato a despejar, con el tiempo de 0.3 s; esto al despejarse con respecto a la aceleración se obtiene 37.03 m/s^2 . Con el dato de la aceleración obtenida, se calcula la fuerza que será el resultado de la aceleración por la masa de 290 kg; lo que da un resultado de 10 739.66 N. Esta es la fuerza que se usará para la simulación de impacto lateral [16].

3.6. Preparación del modelo en ANSYS ACP

El software ANSYS provee la herramienta de Composite PrePost (ACP) para facilitar la construcción del modelo de elementos finitos y acceder a los resultados.

Los modelos reales construidos en materiales compuestos tienen varias capas y numerosos materiales, por eso es fundamental preparar el modelo MEF con la correcta dirección de las capas y apilado de materiales [17].

En la Figura 15 se muestra el modelo final con las capas en ANSYS ACP.

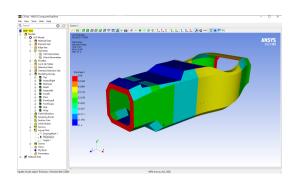


Figura 15. Modelo acabado en ANSYS ACP [15]

3.7. Análisis de la rigidez torsional del modelo mediante MEF

La rigidez torsional está definida físicamente por las siguientes ecuaciones, en este apartado se determina, mediante un análisis MEF, la deformación total. La figura 16 presenta cómo se mide los valores y1,x1. [18]

$$k = \frac{M}{\theta}; \theta = tan^{-1} \left(\frac{y1}{x1}\right)$$

Donde:

M = Momento torsional (N*m)

 θ = Ángulo de deformación (grados)

x1 = Distancia horizontal desde el plano central del vehículo al punto donde se mide la deformación y1

y1 = Deformación en sentido vertical

K = rigidez torsional (N*m/grados)

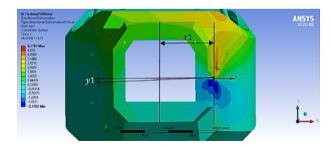


Figura 16. Distancia x1 y y1 [15]

Para esta simulación se aplica una fuerza de $6870~\mathrm{N}$ y se obtiene una deformación media de $1.001~\mathrm{mm}$ y una máxima de $4,2~\mathrm{mm}$ (ver Figura 17), donde el esfuerzo está más concentrado. Tiene una deformación máxima de $5,3~\mathrm{mm}$ por encima del punto de suspensión superior.

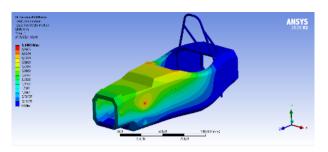


Figura 17. Deformación de rigidez torsional [15]

3.8. Análisis de rigidez longitudinal

Para analizar esta deformación, se aplica una carga de 2500 N sobre el eje delantero, se determina una deformación de 1.99 mm, como se ve en la Figura 18.

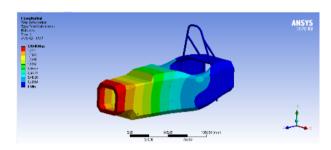


Figura 18. Deformación en rigidez longitudinal [15]

En cuanto al esfuerzo sobre la estructura, el máximo es de 101.44 MPa, como presenta la Figura 19. El esfuerzo es bajo, porque la estructura permite una buena distribución a través de toda la estructura.

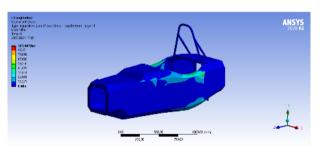


Figura 19. Esfuerzos longitudinales [15]

3.9. Análisis de frenado

En este análisis se aplican dos cargas sobre el eje delantero con un valor de 2500 N en sentido vertical y 2000 N en sentido longitudinal; la deformación máxima es igual 2.12 mm, como se ve en la Figura 20.

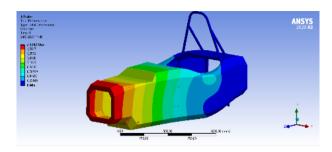


Figura 20. Deformación en el frenado [15]

En cuanto al esfuerzo máximo en la estructura es de 113.16 MPa, el cual no lleva al límite de rotura del material, como presenta la Figura 21.

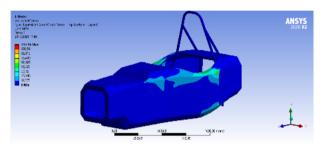


Figura 21. Esfuerzos en el frenado [15]

3.10. Análisis de impacto lateral

El valor a utilizar en este esfuerzo es de 10 739.66 N detallado en la sección 3.53 [15], la deformación máxima como se ve en la Figura 22, es de 1.35 mm.

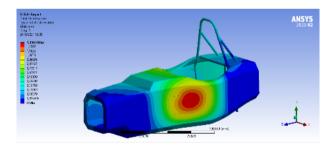


Figura 22. Deformación de impacto lateral [15]

En cuanto al esfuerzo sobre la estructura, alcanza un máximo de 72.61 MPa lo cual indica que se distribuye de mejor manera a través del monocasco, como se ve en la Figura 23.

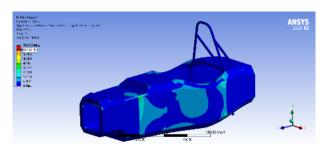


Figura 23. Esfuerzos de impacto lateral [15]

3.11. Simulación de vuelco

En esta simulación son aplicadas tres cargas, una longitudinal, una transversal y una vertical de 6 KN, 5 KN y 9 KN, respectivamente; los resultados conseguidos demuestran un valor máximo de deformación de 16.15 mm (Figura 24) y el esfuerzo máximo presente es de 426.52 MPa (Figura 25) [19].

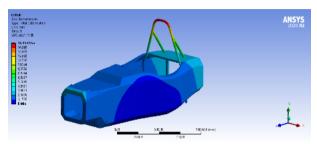


Figura 24. Deformación del Main Hoop [15]

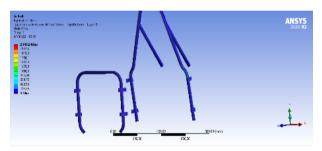


Figura 25. Esfuerzos en el Main Hoop [15]

3.12. Simulación de peso en el suelo

En esta simulación se ubica el peso distribuido de los elementos, sobre todo, el suelo del monocasco. La Tabla 3 detalla el peso de los elementos y la fuerza ejercida de los mismos.

Tabla 3. Peso de los elementos sobre el monocasco [15]

Componente	Peso (kg)	Fuerza (N)
Piloto	75	735.75
Dirección	12.5	122.62
Batería	36	353.16
Caja de pedales	4.5	44.15
Inversor	7	68.67

Los resultados de esta simulación muestran que la deformación máxima en el piso del monocasco es de 0,13 mm (Figura 26) y una tensión máxima de 15 MPa (Figura 27).

Esto indica que el material puede soportar perfectamente el peso de los elementos.

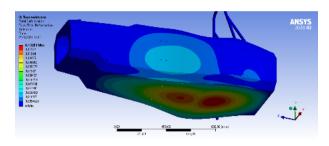


Figura 26. Deformación del suelo [15]

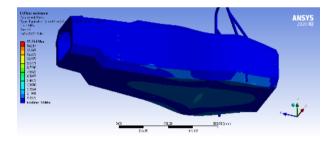


Figura 27. Esfuerzos en el suelo [15]

3.13. Validación de datos

3.13.1. Eficiencia del diseño en cuanto a reducción de peso

Sobre la base de los datos obtenidos, se pasó al análisis de eficiencia en cuanto a la reducción de peso que debería tener el prototipo.

El modelo EB17 se utiliza como objeto de comparación con el diseño del prototipo de este trabajo [10].

Con la Tabla 4 indicada, se concluye que el peso del chasis y carrocería tendrían un valor de 55.31 kg entre ambos, que representa el 23.54 % del peso total [15].

En las estructuras del Main y Front Hoop, el material a aplicar es "AISI 4130 acero normalizado a 870 °C"; los datos se tomaron de la simulación del EB17.

Tabla 4. Masas aproximadas del EB17 [10]

Componente	Masa (kg)	%
Conductor	80	33.75
Motor	12	5.06
Tren de fuerza	20	8.43
Sistema de dirección	10	4.21
Batería	80	33.75
Chasis	35	14.76
Total	237	100

Como se observa en la Figura 28, por medio del software se obtuvo un peso reducido a 4 decimales de 0.0420 t equivalentes a 42 kg, sin el uso del triángulo de seguridad en el programa ANSYS, al sumar los

datos del triángulo de seguridad se obtendría 48.19 kg de peso entre los tres elementos combinados [15].

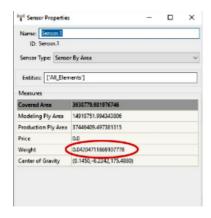


Figura 28. Peso preliminar del monocasco obtenido de ANSYSACP [15]

Para un análisis final, se obtuvo el peso del monocasco, optimizando las capas del modelo, como se demuestra en la Figura 29 En esta ocasión, con sus estructuras triangulares se obtuvo un peso de 0.0227 t (22.7 kg), que reduce casi la mitad del peso inicial.

La integración de los elementos de seguridad incrementó su factor de seguridad y fue capaz de reducir capas de material y así optimizar aún más su peso. Junto con su triángulo de seguridad, el peso final es de 27,2 kg. Un análisis final de su optimización de peso muestra que hay una reducción significativa en comparación con el EB17, que tendría 237 kg, de los cuales 55,31 kg son el peso del chasis y la carrocería. El monocasco tendría un peso final de 27,2 kg, lo que se traduce en una optimización en cuanto a reducción de peso del 47,2 %, lo que supondría 28,11 kg menos para el teórico monoplaza.

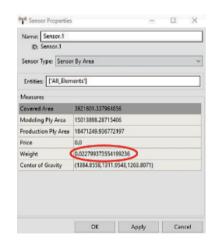


Figura 29. Peso final del monocasco obtenido de ANSYSACP [15]

3.13.2. Comparativa de rigidez torsional

El monocasco tiene una mejor disipación de la tensión a una carga 2,1 veces mayor que el modelo EB17 y tiene una concentración de tensión un 17 % menor. Se tiene el valor K, que determina la rigidez torsional, para el monocasco de 75 % superior al EB17 (Tabla 5), lo que determina la estabilidad del vehículo en curvas, Figura 30.

Tabla 5. Rigidez torsional de los modelos [15]

Modelo	Carga (N)	Esfuerzo máximo	Deformación máxima	K (KNm/grado)
Monocasco	6780	$306.22~\mathrm{MPa}$	$4.2~\mathrm{mm}$	30
EB17	3133	370 MPa	3.8 mm	7.7

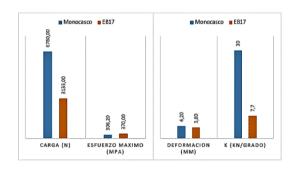


Figura 30. Resultados rigidez torsional [15]

3.13.3. Comparativa de rigidez longitudinal

El monocasco tiene un 11 % menos de carga aplicada en la simulación, lo que significa que el monocasco disipa mejor las tensiones porque tiene un 45 % menos de concentración de esfuerzos y 50 % menos de deformación en comparación con el EB17 (Tabla 6 y Figura 31).

Tabla 6. Comparativa rigidez longitudinal [15]

Modelo	Carga (N)	Esfuerzo máximo	Deformación máxima
Monocasco	2500	$101.44~\mathrm{MPa}$	$1.99~\mathrm{mm}$
EB17	2782.68	182 MPa	4 mm

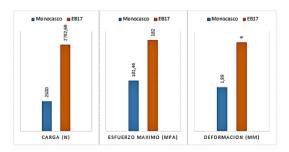


Figura 31. Resultados rigidez longitudinal [15]

3.13.4. Comparativa de frenado

En este análisis intervienen cargas que actúan sobre las ruedas delanteras, con una carga vertical y longitudinal al vehículo (Tabla 7 y Figura 32).

Tabla 7. Análisis de frenado [15]

Modelo	Carga vertical	Carga longitudinal	Esfuerzo máximo	Deformación máxima
Monocasco	2500 N	2000 N	$113.16~\mathrm{MPa}$	$2.12~\mathrm{mm}$
EB17	2782.68 N	2309.63 N	201 MPa	4.2 mm

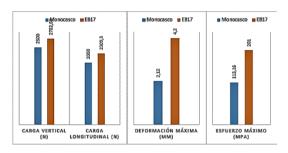


Figura 32. Resultados de frenado [15]

3.13.5. Comparación de impacto lateral

Las cargas en el monocasco son 11 % en la carga vertical y 14 % en la carga longitudinal, la disipación de esfuerzos es mayor en el monocasco, ya que tiene 44 % menos de concentración de esfuerzos que el modelo EB17; la deformación en el monocasco es de 44 % menor que el EB17 (Tabla 8 y Figura 33).

Tabla 8. Análisis impacto lateral [15]

Modelo	Carga (N)	Esfuerzo máximo	Deformación máxima
Monocasco	10740	72.61 MPa	$1.35~\mathrm{mm}$
EB17	7000	361 MPa	3.32 mm

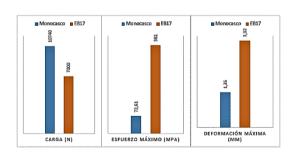


Figura 33. Resultados impacto lateral [15]

Como se puede apreciar, el monocasco tiene mejor disipación de tensiones en su estructura, pues la carga es un 53 % mayor que el modelo EB17 y tiene un 80 % menos de acumulación de tensiones; de igual manera, la deformación que presenta el monocasco es un 60 % menor que su modelo antecesor.

4. Conclusiones

Se determina la oferta de diseño de un monocasco de fibra de carbono para un monoplaza Formula Student, por medio del uso de los softwares SolidWorks y ANSYS para modelado y simulación respectivamente.

La propuesta de chasis tipo monocasco obtuvo una disminución de 47.2 % en el peso en cuanto a su antecesor EB17, el cual fue fabricado con chasis tubular; lo cual demuestra la jerarquía de la implementación de la tecnología de fibra de carbono.

En el diseño planteado se realizó una estructura tipo sándwich por medio del uso del software ANSYS. El cual, en conjunto, da la posibilidad de emplear fibra de carbono tejida y compuesto de aluminio Honeycomb, los cuales demostraron factores de seguridad elevados, deformaciones muy pequeñas, y que, además, cumplen con las normas de seguridad de forma exitosa.

Referencias

- [1] K. P. Hammer, Design and Analysis of a Composite Monocoque for Structural Performance: A Comprehensive Approach. Indiana University— Purdue University, 2019. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.7912/C2/2703
- [2] G. Davies, Materials for automobile Bodies. Elsevier, 2003. [Online]. Available: https://bit.ly/42DnE9K
- [3] Panel Systems. (2023) Larcore aluminium honeycomb panels. Panel Systems Ltda. [Online]. Available: https://bit.ly/41F5dQs
- [4] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design. Butterworth-Heinemann, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/41ETGAV
- [5] F. P. Carballo, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/41z45hu
- [6] C. A. Eurenius, N. Danielsson, A. Khokar, E. Krane, M. Olofsson, and J. Wass, Analysis of Composite Chassis. The Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3o38oE6
- [7] F. Jourdan, Degree Course in Automotive Engineering. Politecnico di Torino, 2019. [Online].
 Available: https://bit.ly/3nZtHqb
- [8] W. B. Riley and A. R. George, "Design, analysis and testing of a formula sae car chassis," in *Motorsports Engineering Conference & Exhibition*. SAE International, dec 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/2002-01-3300

- [9] E. Tsirogiannis, G. Stavroulakis, and S. Makridis, "Design and modelling methodologies of an efficient and lightweight carbon-fiber reinforced epoxy monocoque chassis, suitable for an electric car," *Material Science and En*gineering with Advanced Research, vol. 2, pp. 5–12, 02 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.24218/msear.2017.21
- [10] V. R. Álvarez Salazar, Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/4324j1U
- [11] SAE, The 2020 Formula SAE Rules Version 1.0 are now published online under the Series Resources. SAE International Privacy Policy, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/4539Irb
- [12] W. Contreras, P. Quezada, and L. Ortiz, Propuesta metodológica para el diseño del chasis de un kart tipo KF4. La ingeniería automotriz clave para el desarrollo sostenible de Ecuador, 2018, ch. Diseño Automotriz, pp. 55–77. [Online]. Available: https://bit.ly/42EhUN2
- [13] K. Egger, B. Ford, K. Nagao, N. Sharma, and D. Zusalim, Formula SAE Monocoque Chassis Development. Mechanical Engineering Department. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2020. [Online]. Available: https://bit.ly/42EiIl2
- [14] J. Wu, O. Agyeman Badu, Y. Tai, and A. R. George, "Design, analysis, and simulation of an automotive carbon fiber monocoque chassis," SAE International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, vol. 7, no. 2, pp. 838–861, apr 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/2014-01-1052
- [15] C. A. Jaramillo Andrade and E. J. Pizarro Barrera, Análisis y simulación de un monocasco de fibra de carbono para un monoplaza Formula Student. Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/3pFmc85
- [16] R. Patil, "Fea analysis of fsae chassis," International Journal of Engineering Research and, vol. V9, 07 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV9IS070148
- [17] B. Zhao, Analysis of composite plates by using mechanics of structure genome and comparison with ANSYS. Aeronautics and Astronautics. Purdue University Indianapolis, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/3pQw8LW

- [18] F. P. Ruiz and M. Solís Muñíz, Diseño y cálculo del chasis monocasco de un monoplaza de competición tipo fórmula. Tesis de Grado. Ingeniería Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. España, 2016. [Online]. Available: https://bit.ly/3o8NT91
- [19] M. Tamjidillah, R. Subagyo, H. Isworo, and H. Y. Nanlohy, "Modelling analysis of high effect of roll hoop main on the strength of student car formula chassis," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 1, pp. 26–40, 05 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0014.1959





Correlación para el cálculo de la fricción turbulenta en tuberías

Correlation for the calculation of turbulent friction in pipes

San Luis Tolentino^{1,*} Omar González²

Recibido: 25-01-2023, Recibido tras revisión: 21-04-2023, Aceptado: 18-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

En los sistemas hidráulicos de redes de tuberías, uno de los parámetros fundamentales es el factor de fricción λ . El factor de fricción se determina con la ecuación implícita de Colebrook-White por medios iterativos, lo cual dificulta su aplicación. En el presente trabajo se construye una correlación basada en el método recursivo para el cálculo del factor de fricción, para lo cual se empleó la ecuación de Colebrook-White. Para el cierre de la correlación se proponen dos relaciones empíricas, donde sus coeficientes y exponentes fueron calibrados en Excel 2019. Se compararon los resultados de las dos relaciones que se proponen con las relaciones de Swamee-Jain y Haaland, para incrementos recursivos, donde para la correlación λ_8 se obtuvo el error porcentual máximo del factor de fricción de 0,0000017 %, para la rugosidad relativa de 0,00001 y número de Reynolds 4000; así como, los decimales arrojaron siete dígitos decimales exactos para el factor de fricción. Para Reynolds mayores de 4000, el error porcentual disminuve. Se concluve que la correlación en función de las relaciones explícitas que se proponen satisface a la solución de la ecuación implícita de Colebrook-White.

Palabras clave: correlación, ecuación de Colebrook-White, error porcentual, factor de fricción, método recursivo

Abstract

One of the essential parameters in hydraulic systems of pipe networks is the friction factor λ . The friction factor is determined using the implicit Colebrook-White equation through iterative methods, which makes its application challenging. In this work, a correlation based on the recursive method is developed to calculate the friction factor using the Colebrook-White equation. Two empirical relationships are proposed to finalise the correlation, with coefficients and exponents calibrated in Excel 2019. The results of the two proposed relationships were compared with the Swamee-Jain and Haaland relationships for recursive increments. For the λ_8 correlation, the maximum percentage error of the friction factor was 0,0000017\%, for a relative roughness of 0.00001 and a Reynolds number of 4000. Additionally, the calculations yielded seven exact decimal digits for the friction factor. For Reynolds numbers greater than 4000, the percentage error decreases. As a result, it is concluded that the correlation based on the proposed explicit relationships satisfies the solution of the implicit Colebrook-White equation.

Keywords: Correlation, Colebrook-White equation, Percentage error, Friction factor, Recursive method

Forma sugerida de citación: Tolentino, S. L. y González, O. "Correlación para el cálculo de la fricción turbulenta en tuberías," $Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología, N.^{\circ} 30, pp. 54-63, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30. 2023.05.$

¹,*Group of Mathematical Modeling and Numerical Simulation (GMMNS), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Autor para correspondencia ≅: sanluist@gmail.com.

²Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú.

1. Introducción

En los sistemas de redes de tuberías de procesos industriales, el comportamiento del flujo interno presenta fluctuaciones de velocidad, presión, temperatura, entre otros parámetros; el flujo se impulsa mediante la diferencia de presión, y la fricción del flujo está presente.

Para una tubería o instrumento de medición, existe un gradiente de presión, velocidad, temperatura; la velocidad del flujo es máxima en la región central y en la pared la velocidad se considera nula por la condición de no deslizamiento. Por tanto, una caída de presión ocasionada por esfuerzos viscosos representa una pérdida de presión irreversible llamada pérdida de presión [1,2]. Por ejemplo, en equipos experimentales de medición de caudal, tales como para el caso de un tubo Venturi, las caídas de presión en la sección de la garganta son abruptos, y en las paredes de las uniones de la sección de la garganta con las secciones convergentes y divergentes presentan menores caídas de presión con respecto a la región central del flujo [3].

El régimen de flujo se clasifica en laminar, transición y turbulento. Para el caso de flujo laminar, se caracteriza por líneas de corriente suaves y paralelas con movimiento ordenado, y es común en fluidos con alta viscosidad y con movimiento a baja velocidad. Mientras que el flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias de remolinos a diferentes escalas. Estos remolinos transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo, por lo que las regiones afectadas presentan aumento de cantidad de movimiento, de masa y transferencia de calor.

En consecuencia, el flujo turbulento está relacionado con variaciones de valores muy altos de coeficientes de fricción, transferencia de masa y transferencia de calor [1,2].

Osborne Reynolds [4] realizó experimentos para el flujo en secciones de tuberías y descubrió que el régimen de flujo está relacionado con la razón de las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas en el fluido. La razón de las fuerzas es nombrada número de Reynolds, R_e , y se expresa como $R_e = Vd/\nu$, donde V es la velocidad promedio, d es el diámetro interno de la tubería, $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática, μ es la viscosidad dinámica y ρ la densidad del fluido [1, 2].

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la viscosidad y velocidad del flujo, así como de la geometría de la tubería, la rugosidad de la pared interna, la temperatura de la pared, entre otros factores. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo se clasifica como flujo laminar para $R_e \leq 2300$, flujo turbulento para $R_e \geq 4000$ y flujo en transición en el rango de $2300 \leq R_e \geq 4000$ [1,2].

Colebrook y White [5,6] propusieron una ecuación implícita para el cálculo del factor de fricción, λ , del flujo turbulento en tuberías, basado en sus resulta-

dos de sus investigaciones experimentales, la cual se expresa como la ecuación de Colebrook-White (1):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2log\left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{2.51}{R_e\sqrt{\lambda}}\right] \tag{1}$$

La ecuación de Colebrook-White es una combinación de datos para flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas. El parámetro ε es la rugosidad relativa, y se define como $\varepsilon = k/d$; donde k es la altura promedio de la rugosidad del material y d el diámetro interno de la tubería; y el parámetro R_e es el número de Reynolds. Señalando que, los parámetros λ , ε y R_e son adimensionales.

El factor de fricción de la ecuación de Colebrook-White no se puede despejar aplicando procedimientos algebraicos para obtener una solución exacta y explícita, en consecuencia, el factor de fricción se determina por métodos numéricos aplicando procedimientos iterativos en códigos computacionales, tales como el método de Newton-Raphson, bisección, punto fijo, entre otros. Por tanto, en el diseño de redes de tuberías se dificulta obtener el factor de fricción debido a los laboriosos cálculos por métodos iterativos.

Como solución alternativa a la ecuación implícita de Colebrook-White, Moody [7] propuso una expresión gráfica de dicha ecuación, la cual es un diagrama utilizado en ingeniería para obtener el factor de fricción. Sin embargo, para determinar el factor de fricción se genera un error numérico, por lo cual el resultado es aproximado.

En la literatura se reportan correlaciones empíricas que son explícitas para el cálculo del factor de fricción como solución aproximada, donde las estructuras de las relaciones empíricas se basan en la ecuación de Colebrook-White. Las ecuaciones empíricas más conocidas y utilizadas son la ecuación (2) de Swamee-Jain [8], que tiene un error máximo estimado de 3,2 %, y la ecuación (3) de Haaland [9] que tiene un error máximo estimado de 2,1 %.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2log\left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}}\right] \tag{2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8log\left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7}\right)^{1,11} + \frac{6,9}{R_e}\right]$$
 (3)

Con el propósito de reducir el error numérico del factor de fricción en función de ε y R_e , diferentes autores han propuesto relaciones empíricas y explícitas, para lo cuales han aplicado diferentes métodos para obtener la solución.

Se nombran algunos autores, tales como Mikata y Walczack [10], Rollmann y Spindler [11] y Biberg [12] que aplican la función ω de Lambert. Serghides [13], Vatankhah [14] y Azizi et al. [15] obtienen correlaciones mediante combinaciones de procedimientos algebraicos. Chen [16], Schorle et al. [17], Zigrang y Sylvester [18],

Sousa et al. [19], Romeo et al. [20] y Offor y Alabi [21] obtienen correlaciones mediante el método recursivo con modificaciones de las constantes y exponentes. Así como, Santos et al. [22] y Alfaro et al. [23] realizan evaluaciones experimentales para el cálculo del factor de fricción.

Además de los autores antes señalados, Pérez et al. [24] reportan una lista de cuarenta y nueve (49) relaciones explícitas para el cálculo del factor de fricción. La lista comienza con la ecuación de Moody [7] y termina con la de Azizi et al. [15].

Cabe señalar que estudios recientes presentan revisiones de errores del factor de fricción para algunas correlaciones reportadas en la literatura [25], y exponen que la relación propuesta por Praks y Brkić [26] arroja un máximo error porcentual de 0,001204%, la relación propuesta por Serghides [13] arroja 0,00256 %; la relación propuesta por Vantakhak [14] arroja 0,005952 %, y la relación propuesta por Romeo et al. [20] arroja 0,007468 %. Mientras que, Lamri y Easa [27] aplican el teorema de inversión de Lagrange, y para cuatro términos obtienen el error de 0,002 %.

De los resultados reportados por los autores señalados, el error producido por cada ecuación empírica se debe a la forma en que se estructura la ecuación con los términos algebraicos que lo componen, así como por los coeficientes y exponentes.

La precisión numérica en la cantidad de dígitos de los decimales del factor de fricción está relacionada con el error relativo porcentual, por lo que es importante la calibración de los coeficientes y exponentes para una nueva correlación empírica y que sea simple en toda su estructura como modelo matemático.

En el presente trabajo se construye una correlación explícita que está basado en el método recursivo, para el cálculo del factor de fricción de flujo turbulento en tuberías. Así también, se evalúa la correlación para cuatro relaciones explícitas que calculan el factor de fricción para la primera aproximación inicial. En la sección 2 se presenta la metodología; en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos del factor de fricción y los errores porcentuales; seguidamente, en la sección 4 se exponen las conclusiones del análisis realizado.

2. Materiales y métodos

2.1. Representación gráfica del ajuste de la curva de correlación

La Figura 1 muestra un esquema genérico para tres trayectorias de curvas. Se ilustra la curva de una función analítica implícita y = f(x, y); la curva de una función empírica explícita y = h(x), que está desfasada de la curva de la función analítica. La curva segmentada corresponde a la correlación, la cual es la

función de recursión $y_{n+1} = f(x, y_n)$, y esta función está próxima a la curva de la función analítica.

En un punto local de referencia (x_o, y_o) para la función empírica $y_o = h(x_o)$, los datos x_o están dentro del rango desde x_a hasta x_b (eje x), y los datos de salida y_o está dentro del rango desde y_o hasta y_b (eje y). Para la función analítica, para x_o , el dato de salida es y_m , siendo el punto de referencia (x_o, y_m) . Asimismo, para la recursión, para el dato x_o , el dato de salida es y_{n+1} , siendo la posición de referencia (x_0, y_{n+1}) . Para un punto fijo x_o , a medida que se incrementa los términos algebraicos de la recursión y_{n+1} , la cual inicia a partir de y_o , la variable dependiente y_{n+1} se aproxima a y_m el cual es un dato fijo, por tanto, el error numérico se reduce progresivamente hasta lograr la convergencia numérica $y_m = y_{n+1}$. Por tanto, para un barrido de datos de entrada x_o , la curva de la recursión quedaría superpuesta sobre la curva analítica en el rango de $x_a \leq x_o \leq x_b$, y los datos de salida en el rango de $y_a \leq y_{n+1} \leq y_b$.

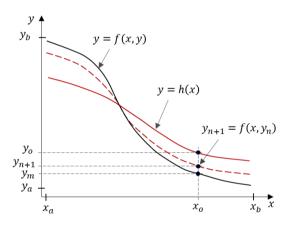


Figura 1. Esquema básico de representaciones de las curvas de la función analítica, empírica y de la recursión

De manera general, para el esquema de la Figura 1, los pasos del método recursivo son los que se muestran en la ecuación (4).

$$y_{1} = f(x_{o}, y_{o}) y_{2} = f(x_{o}, y_{1}) y_{3} = f(x_{o}, y_{2}) \vdots y_{n+1} = f(x_{o}, y_{n})$$
(4)

Donde la primera aproximación es y_1 , la segunda es y_2 , la tercera y_3 , y la última es y_{n+1} ; siendo de manera creciente la sucesión para y_{n+1} , el cual inicia desde n=0.

La función $y_o = h(x_o)$ es una representación matemática de una expresión que está explícita, la cual permite el cierre como primer cálculo inicial, siendo y_o la primera solución aproximada.

2.2. Relación explícita

Para el cálculo de la primera aproximación inicial del factor de fricción λ_o , es necesario establecer una expresión matemática como una relación explícita para dicha solución aproximada.

En ese sentido, para obtener la relación explícita λ_o se tomó en cuenta la ecuación (1) de Colebrook-White [5,6]. Al argumento de la ecuación de Colebrook-White se le eliminó $\sqrt{\lambda}$, y se acondicionaron las ubicaciones de los coeficientes a_i y exponentes n_i . De manera que, la relación explícita λ_o para el primer cálculo del factor de fricción se estructuró como la ecuación (5).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = a_1 log \left[\left(\frac{\varepsilon}{a_2} \right)^{n_1} + \left(\frac{a_3}{R_e} \right)^{n_2} \right] \tag{5}$$

Los datos de entrada son los parámetros independientes: la rugosidad relativa ε y el número de Reynolds R_e , y se establecieron en el rango de $1 \times 10^{-06} \le \varepsilon \le 0,05$ y $4000 \le R_e \le 1 \times 10^{+08}$. Y el dato de salida es λ_o .

Los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 y los exponentes n_1 y n_2 de la ecuación (5) fueron calibrados de manera iterativa en una hoja de cálculo de Excel 2019, tomando como datos patrón la ecuación (1) de Colebrook-White. Se consideraron los mejores resultados de las magnitudes de los coeficientes y de los exponentes para el establecimiento de dos relaciones explícitas.

En la Tabla 1 se presentan las magnitudes de los coeficientes y exponentes, para las dos relaciones explícitas que se proponen, las cuales se presentan como las ecuaciones (6) y (7).

Tabla 1. Valores calibrados de coeficientes y exponentes

	Coeficiente			Expor	nente
	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	$\mathbf{a_3}$	$\mathbf{n_1}$	n_2
Ec. (6):	1,795	3,9	6,94	1,104	-
Ec. (7):	2	3,7	6,94	-	0,9

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -a_1 log \left[\left(\frac{\varepsilon}{a_2} \right)^{n_1} + \frac{a_3}{R_e} \right]$$
 (6)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -a_1 log \left[\frac{\varepsilon}{a_2} + \left(\frac{a_3}{R_e} \right)^{n_2} \right] \tag{7}$$

2.3. Acondicionamiento de la correlación

Basado en el método recursivo, a la ecuación (1) de Colebrook-White [5,6] se le acondicionó para el cálculo del factor de fricción como dato de salida λ_{n+1} , y como dato de entrada λ_n , la cual se expresa como la ecuación (8).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{n+1}}} = a \log \left[b + c \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \right] \tag{8}$$

Donde
$$a = -2$$
, $b = \varepsilon/3$, 7 y $c = 2$, $51/R_e$.

La ecuación (8) está basada en el logaritmo de base 10, la cual se emplea en los cálculos del presente trabajo. También, se puede expresar en función del logaritmo natural, siendo $1/\sqrt{\lambda_{n+1}} = a_1 ln \left[b + c/\sqrt{\lambda_n}\right]$, donde $a_1 = a/ln(10)$.

Con la ecuación (8) se estructuró la correlación expresada como la ecuación (9) para el cálculo de incrementos de la sucesión $\lambda_{n+1} = \lambda_2, \lambda_4, \lambda_6, \lambda_8$.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_8}} = a \log [b + ac \log [b + cD]]$$

$$D = a \log [b + ac \log [b + cC]]$$

$$C = a \log [b + ac \log [b + cB]]$$

$$B = a \log [b + ac \log [b + cA]]$$
(9)

Siendo
$$D = \frac{1}{\sqrt{\lambda_6}}$$
, $C = \frac{1}{\sqrt{\lambda_4}}$, $B = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}$ y $A = \frac{1}{\sqrt{\lambda_o}}$.

Adicionalmente, a la ecuación (9) se le incrementó los términos para evaluar hasta $\lambda_{n+1} = \lambda_{20}$, mas no se presenta la expresión matemática para λ_{20} por ser el procedimiento similar. Ya que, de manera general, se aplica el mismo principio de la ecuación (8).

El propósito de evaluar la correlación de manera segmentada fue para determinar la tendencia en la disminución del error porcentual del factor de fricción para diferentes valores del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

Como dato de entrada de λ_o para $A=1/\sqrt{\lambda_o}$ en la ecuación (9), se tomó en cuenta cuatro relaciones explícitas: la relación de Swamee-Jain [8] (ecuación (2)), la de Haaland [9] (ecuación (3)), así como, las ecuaciones (6) y (7) que se proponen en el presente trabajo. Donde, cada relación se evaluó de manera separada en la ecuación (9).

El cálculo del error porcentual del factor de fricción $\lambda(\%)$ se determinó con la siguiente ecuación (10).

$$\lambda(\%) = 100 \left| \frac{\lambda_m - \lambda_{n+1}}{\lambda_m} \right| \tag{10}$$

Donde λ_m es el factor de fricción de la solución exacta de la ecuación de Colebrook-White, y λ_{n+1} es el factor de fricción de la ecuación (9).

Cabe señalar, que todos los cálculos numéricos y gráficas fueron realizadas en una hoja de cálculo de Excel 2019.

3. Resultados y discusión

3.1. Correlación y relaciones explícitas para el cálculo del factor de fricción

La correlación construida por el método recursivo está expresada como la ecuación (9), siendo a=-2, $b=\varepsilon/3, 7, c=2,51/R_e$. Esta correlación es una expresión matemática que modela la trayectoria de la curva del factor de fricción, λ , en función de la rugosidad relativa, ε , y el número de Reynolds, R_e . Siendo el

término $A=1/\sqrt{\lambda_o}$, y en la cual se sustituyen las relaciones explícitas de la forma $1/\sqrt{\lambda_o}$ que actúan como cierre de la correlación. Las dos relaciones explícitas que se proponen en el presente trabajo para el cierre de la ecuación (9), son las ecuaciones (6) y (7).

Cabe señalar, que la ecuación (9) es simple en su estructura para cálculos directos, la cual mejora la respuesta en la disminución del error del factor de fricción para cada incremento de términos en la recursión, por tanto, los dígitos decimales exactos del factor de fricción se incrementan.

A continuación, se presentan los errores porcentuales del factor de fricción que arroja la ecuación (9), para las relaciones explícitas que actúan como cierre para $A=1/\sqrt{\lambda_o}$, la ecuación (2) de Swamee-Jain, la ecuación (3) de Haaland, y las ecuaciones (6) y (7) que se proponen.

3.2. Errores porcentuales del factor de fricción

Las gráficas de las trayectorias de las curvas de los errores porcentuales del factor de fricción λ_o , como cálculo de la primera aproximación inicial para las ecuaciones (2), (3), (6) y (7) se muestran en la Figura 2. Las trayectorias de las curvas son fundamentales, en primera instancia, para comprender el efecto que tienen los coeficientes y exponentes para valores variables de la rugosidad relativa, ε , y el número de Reynolds, R_e .

Para el rango del número de Reynolds $4000 \le R_e \le 1 \times 10^{08}$ y el rango de la rugosidad relativa $1\times 10^{-06} \le \varepsilon \le 0,05$, la ecuación (6)) presenta el error porcentual máximo estimado de 2,1 % y la ecuación (7)) el error de 3,1 %. Mientras que, la ecuación (2) de Swamee-Jain presenta el error máximo estimado de 3,2 % y la ecuación (3) de Haaland el error de 2,1 %. En ciertas regiones, las ecuaciones (2), (3), (6) y (7) presentan errores alrededor de 0,1 % (Figura 2). Cabe señalar que las figuras solo muestran las trayectorias de las curvas para el rango de la rugosidad relativa $0,00001 \le \varepsilon \le 0,05$.

Para $\varepsilon = 0,05$ (Figura 2a) las ecuaciones (3) y (7) presentan trayectorias con tendencia horizontal a partir de la posición local $R_e = 1 \times 10^{05}$. Mientras que, la curva de la ecuación (7) se superpone a la curva de la ecuación (2) y tiene una tendencia de una recta con pendiente negativa. Para $\varepsilon = 0,00001$ (Figura 2d) las fluctuaciones de las curvas del factor de fricción son mayores con respecto a las otras curvas ilustradas en la misma Figura 2.

Se puede observar que para tubos hidráulicamente rugosos ($\varepsilon=0,05$) las tendencias distan entre sí mucho más que en tubos hidráulicamente lisos ($\varepsilon=0,00001$), sobre todo, las ecuaciones (2) y (7) para la curva de la Figura 2a.

Las curvas muestran que los coeficientes y exponentes de cada una de las relaciones tienen un efecto dominante que definen su propio comportamiento de trayectoria.

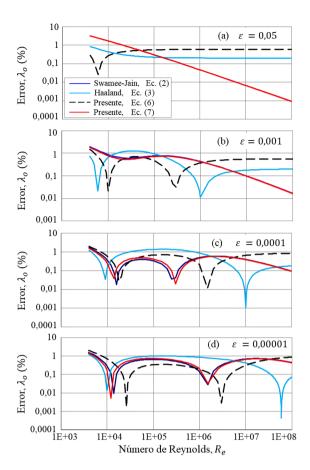


Figura 2. Errores porcentuales del factor de fricción para λ_o , como cálculo de la primera aproximación de las ecuaciones (2), (3), (6) y (7)

Cabe señalar, para la Figura 2 y otras figuras siguientes que se señalan más adelante, en los picos descendentes para determinados números de Reynolds, allí se presentan puntos de inflexión de las curvas y las mismas no se pueden apreciar, porque los datos de salida de los errores (eje y) están en valores absolutos de acuerdo con la ecuación (10). También es importante destacar que el eje vertical está a escala logarítmica de base 10, y esto fue debido para lograr que las trayectorias de las curvas puedan ser analizadas.

Con respecto a las trayectorias de las curvas de los errores porcentuales del factor de fricción para λ_2 , λ_4 , λ_6 y λ_8 se muestran en las Figuras 3, 4, 5 y 6. Se observa que para las ecuaciones (2), (3), (6) y (7) definen trayectorias de sus propias curvas a medida que se incrementan los términos. Para cada valor de ε , en la posición $R_e = 4000$, para λ_2 , λ_4 , λ_6 y λ_8 , allí las trayectorias de las curvas presentan el mayor error relativo porcentual del factor de fricción.

Las regiones para los máximos errores del factor de fricción se presentan para las posiciones locales $\varepsilon=0,00001$ y $R_e=4000$, tal como se muestran en las Figuras 3d, 4d, 5d y 6d.

Las ecuaciones (2), (3), (6) y (7) para λ_8 (Figura 6d) tienen errores menores de 0,000002 %. Mientras

que, para λ_6 (Figura 5d) se presenta errores máximos de 0,00006 %. Para λ_4 (Figura 4d) se presenta errores de 0,002 %, y para λ_2 (Figura 3d) presenta errores de 0,061 %.

Se evidencia que las magnitudes de los coeficientes y exponentes para cada relación explícita tienen un comportamiento particular, y evoluciona la trayectoria de las curvas a medida que se incrementa la rugosidad relativa para el mismo rango de número de Reynolds, tal como se muestran en las Figuras del 2 al 6. Sería de interés, en trabajos posteriores, que se realicen comparaciones con otras relaciones explícitas, sustituyendo en la ecuación (9), para determinar con cuál de ellas se obtendría menores errores porcentuales.

Cabe señalar, algo parecido con la Figura 2a ocurre para la Figura 3a, para λ_2 y $\varepsilon=0,05$, para las ecuaciones (2) y (7) que difiere más en tubos hidráulicamente rugosos, con una tendencia de curvas rectas con pendiente negativa. Así como, las ecuaciones (3) y (6) también presentan curvas rectas, y se interceptan en la región alrededor de $R_e=1\times10^{05}$. También ocurre para las Figuras 4a, 5a y 6a, que tienen trayectorias con tendencia de curvas rectas para tuberías rugosas ($\varepsilon=0,05$), respectivamente.

La Tabla 2 presenta los errores máximos del factor de fricción para $\varepsilon = 0,00001$ y los números de Reynolds locales 4×10^{03} , 1×10^{04} , 1×10^{05} , 1×10^{06} , 1×10^{07} y 1×10^{08} , para λ_o , λ_2 , λ_4 , λ_6 y λ_8 , las cuales están relacionadas con las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6. Para la ecuación (6) y λ_8 , y las condiciones $\varepsilon = 0,00001$ y $R_e = 4 \times 10^{03}$, el error porcentual máximo del factor de fricción es $1,7 \times 10^{-06}$ %. Para las ecuaciones (2), (3) y (7), los errores son menores de $1,7 \times 10^{-06}$ %.

Cabe señalar que a medida que se incrementa la recursión, disminuyen los errores porcentuales, en consecuencia, los factores de fricción para λ_8 presentan siete dígitos decimales exactos para $\varepsilon=0,001$, ocho dígitos exactos para $\varepsilon=0,0001$ y nueve dígitos exactos para $\varepsilon=0,05$ y $\varepsilon=0,0001$, con respecto al factor de fricción de la ecuación (1) de Colebrook-White, tal como se muestran en la Tabla 3. Para recursiones menores de λ_8 , los decimales exactos disminuyen; para λ_6 es igual a seis dígitos exactos, para λ_4 es igual a cinco dígitos exactos, así como para λ_2 es igual a cuatro dígitos exactos.

Para la ecuación (9) y λ_8 se obtuvo el mayor error porcentual máximo del factor de fricción de 0,0000017%; el cual está muy por debajo de los errores porcentuales reportados por Brkić y Stajić [25], quienes, Praks y Brkić [26] obtuvieron errores alrededor de 0,001204 % y, Serghides [13] obtuvo el error de 0,002560%. Cabe señalar que los errores porcentuales reportados por Brkić y Stajić [25] no han sido verificados mediante cálculos numéricos por los autores del presente trabajo, en ese sentido, solo se expone con fines comparativos.

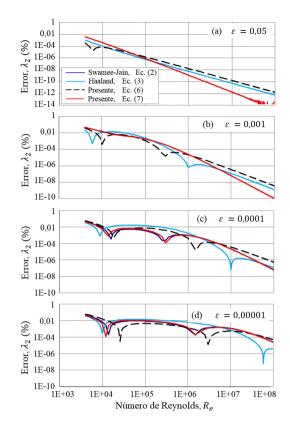


Figura 3. Errores porcentuales del factor de fricción para λ_2

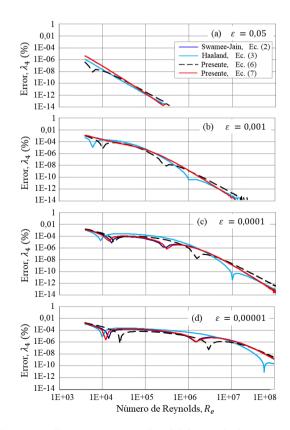


Figura 4. Errores porcentuales del factor de fricción para λ_4

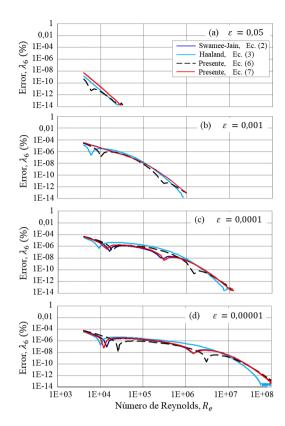


Figura 5. Errores porcentuales del factor de fricción para λ_6

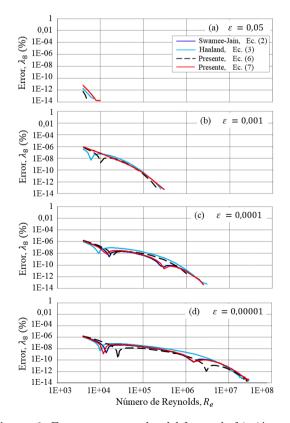


Figura 6. Errores porcentuales del factor de fricción para λ_8

Tabla 2. Errores porcentuales, λ (%), del factor de fricción de las recursiones, para $\varepsilon = 0,00001$ y R_e locales

Error	Ec. (2)	Ec. (3)	Ec. (6)	Ec. (7)		
λ (%)	$R_e = 4E + 03$					
$\overline{\lambda_0}$	1,6182	1,2790	2,0294	1,4803		
λ_2°	0,0482	0,0381	0,0610	0,0441		
λ_4	0,0014	0,0011	0,0018	0,0013		
λ_6	4,4E-05	3,5E-05	5,0E-05	4,0E-05		
λ_8	$1,\!4\text{E-}06$	1,1E-06	1,7E-06	1,2E-06		
λ (%)		$R_e = 1$	1E + 04			
λ_0	$0,\!2958$	0,0132	0,7047	$0,\!1769$		
λ_2	0,0068	0,0003	0,0163	0,0041		
λ_4	1,6E-04	7,2E-06	3,8E-04	$9,\!6E-05$		
λ_6	3,7E-06	1,7E-07	8,8E-06	2,3E-06		
λ_8	8,6E-08	3,9E-09	2,1E-07	5,2E-08		
λ (%)		$R_e = 1$	1E + 05			
λ_0	0,6637	1,0164	0,3413	0,7522		
λ_2	0,0088	0,0135	0,0045	0,0099		
λ_4	1,2E-04	1,8E-04	$6,\!0 ext{E-}05$	1,4E-04		
λ_6	1,6E-06	2,4E-06	7,9E-07	1,8E-06		
λ_8	2,1E-08	3,2E-08	1,1E-08	2,3E-08		
λ (%)		$R_e = 1$	1E + 06			
λ_0	0,1380	0,8650	$0,\!1948$	0,2036		
λ_2	0,0010	0,0062	0,0013	0,0014		
λ_4	7,1E-06	4,5E-05	1,0E-05	1,1E-05		
λ_6	$5{,}1E{-}08$	$3,\!2\text{E-}07$	7,2E-08	$7,\!6\text{E-}08$		
λ_8	3,7E-10	2,3E-09	5,2E-10	5,4E-10		
λ (%)		$R_e = 1$	1E + 07			
λ_0	0,6984	0,4194	0,3166	0,6651		
λ_2	0,0011	7,0E-04	5,3E-04	0,0011		
λ_4	2,0E-06	1,2E-06	8,8E-07	1,80E-06		
λ_6	$3,\!2\text{E-}09$	1,9E-09	1,5E-09	3,1E-09		
λ_8	5,3E-12	3,3E-12	2,4E-12	5,1E-12		
λ (%)	$R_e = 1E + 08$					
λ_0	0,4423	0,0732	0,8823	0,4351		
λ_2	2,4E-05	3,9E-06	4,7E-05	2,3E-05		
λ_4	1,3E-09	2,1E-10	2,5E-09	1,3E-09		
λ_6	$6,\!4\text{E-}14$	0	$1,\!3\text{E-}13$	6,4E-14		
λ_8	0	0	0	0		

La Figura 7 muestra la disminución del error porcentual del factor de fricción a medida que se incrementa la recursividad para λ_2 , λ_4 , λ_6 , λ_8 , hasta λ_{20} .

Para las ecuaciones (2), (3) (6) y (7), $\varepsilon = 0,00001$ y posición local $R_e = 4E + 03$, la magnitud de λ_9 reporta el error porcentual de 2,85E - 07 %, λ_{10} reporta 4,95E - 08 %, λ_{11} reporta 8,55E - 09 %; λ_{12} reporta 1,5E - 09 %, λ_{14} reporta 4,5E - 11 %, λ_{16} reporta 1,5E - 12 %, λ_{18} reporta 5,5E - 14 %, y por último λ_{20} reporta el error de 0,0 %.

Para otros valores de rugosidad relativa y números de Reynolds, los errores porcentuales del factor de fricción son menores. En la cual se evidencia que a medida que se incrementa el número de Reynolds se requiere de menos términos en la recursión para la convergencia numérica.

Tabla 3. Comparación de valores numéricos de factores de fricción de las recursiones con respecto a la ecuación (1) de Colebrook-White, para $R_e=4E+03$ y ε locales

	Ec. (2)	Ec. (3)	Ec. (6)	Ec. (7)
λ	Ec. (1): $\lambda = 0.070$	6986834; $\varepsilon =$	0,05
λ_0	0,0793827	0,0776348	0,0772007	0,0793531
λ_2	$0,\!0769896$	0,0769876	0,0769870	$0,\!0769895$
λ_4	$0,\!0769868$	0,0769868	0,0769868	$0,\!0769868$
λ_6	$0,\!0769868$	0,0769868	0,0769868	0,0769868
λ_8	0,0769868	0,0769868	0,0769868	0,0769868
λ	Ec. (1	1): $\lambda = 0.040$	9910389; $\varepsilon =$	0,001
λ_0	0,0416954	0,0412161	0,0415108	0,0416423
λ_2	0,0409306	0,0409183	0,0409259	0,0409293
λ_4	0,0409109	0,0409105	0,0409107	0,0409108
λ_6	0,0409104	0,0409103	0,0409104	0,0409104
λ_8	0,0409103	0,0409103	0,0409103	0,0409103
λ	Ec. (1): $\lambda = 0,0400$	$008431; \varepsilon = 0$	0,0001
λ_0	0,0406678	0,0404853	0,0407853	0,0406129
λ_2	0,0400278	0,0400224	0,0400312	0,0400262
λ_4	0,0400090	0,0400088	0,0400091	0,0400089
λ_6	0,0400084	0,0400084	0,0400084	0,0400084
λ_8	0,0400084	0,0400084	0,0400084	0,0400084
λ	Ec. (1)	$\lambda = 0.0399$	$017166; \varepsilon = 0$,00001
λ_0	0,0405631	0,0404277	0,0407272	0,0405080
λ_2	$0,\!0399364$	0,0399324	0,0399412	0,0399347
λ_4	0,0399177	0,0399176	0,0399178	0,0399176
λ_6	0,0399171	0,0399171	0,0399171	0,0399171
λ_8	0,0399171	0,0399171	0,0399171	0,0399171

Para tuberías hidráulicas con valores menores de $\varepsilon=0,00001$, incluso para $\varepsilon=0$, la ecuación (9) es aplicable. Al sustituir $\varepsilon=0$, la ecuación (9) se simplifica, y numéricamente las curvas de los errores del factor de fricción son parecidas a las trayectorias de las curvas mostradas en la Figura 7c; y los resultados de las gráficas y tablas no se presentan por ser casi similares. Donde, para λ_8 , para el rango de $4000 \le R_e \le 1E + 08$, el error porcentual es menor de 1,5E-06 %.

Las ecuaciones de Swamee-Jain y Haaland fueron evaluadas en la ecuación (9), a partir de λ_2 , las cuales arrojan resultados similares con respecto a las evaluaciones de las ecuaciones (6) y (7) que se proponen.

En ese sentido, cualquier ecuación que tenga estructuras diferentes a las ecuaciones (6) y (7) y que las mismas sean utilizadas en la ecuación (9), pueden reducir su error porcentual del factor de fricción.

La ventaja de la ecuación (9) radica en la simplicidad de su construcción y su fácil uso para calcular directamente el factor de fricción como una solución aproximada.

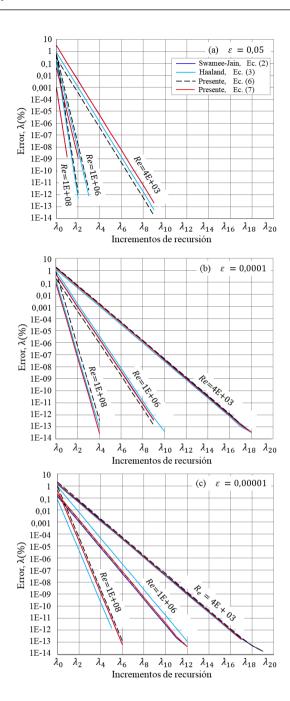


Figura 7. Errores porcentuales del factor de fricción para las ecuaciones (2), (3), (6) y (7)

4. Conclusiones

Basándose en los análisis realizados, se concluye que:

La correlación expresada como la ecuación (9) para λ_8 , y las relaciones explícitas que actúan como cierre que son expresadas como las ecuaciones (6) y (7) para el cálculo de λ_o como aproximación inicial, satisfacen como solución aproximada para la solución de la ecuación (1) implícita de Colebrook-White. La ecuación (9) es aplicable para el flujo turbulento dentro del rango estudiado del número de

Reynolds $4000 \le R_e \le 1E + 08$ y rugosidad relativa $0,05 \ge \varepsilon \ge 0,00001$; y como una extensión del estudio realizado, es posible su aplicación para tuberías lisas dentro del rango de número de Reynolds antes señalado. Así como, se acota que la ecuación (9) no es aplicable para $R_e < 4000$.

Dentro del rango de la rugosidad relativa, $0,05 \geq \varepsilon \geq 0,00001$, y número de Reynolds, $4 \times 10^{03} \leq R_e \leq 1 \times 10^{08}$, el error porcentual máximo del factor de fricción reporta un valor estimado de $1,7 \times 10^{-06}$ %, para $\varepsilon = 0,00001$ y $R_e = 4 \times 10^{03}$. Donde el factor de fricción tiene siete dígitos decimales exactos. Para otros valores de la rugosidad relativa y números de Reynolds, las magnitudes numéricas del factor de fricción presentan más de siete dígitos decimales exactos.

Asimismo, para recursiones mayores de λ_8 , los dígitos decimales exactos se incrementan. Para $\varepsilon=0,00001$ y $R_e=4\times10^{03},\,\lambda_{10}$ reporta el error de 4,95×10⁻⁰⁸ %, λ_{14} reporta 4,5×10⁻¹¹ %, y, finalmente, para λ_{20} reporta el error de 0,0 %.

Referencias

- [1] F. M. White, *Fluid Mechanics*. McGraw Hill, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/3ICSyXO
- [2] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-HillHigher Education, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/43sCUX3
- [3] S. L. B. Tolentino Masgo, "Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 23, pp. 9–22, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.01
- [4] O. Reynolds, "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels," *Philosophical Transactions of the Royal Society* of London, vol. 174, pp. 935–982, 1883. [Online]. Available: https://doi.org/10.1098/rstl.1883.0029
- [5] C. F. Colebrook, C. M. White, and G. I. Taylor, "Experiments with fluid friction in roughened pipes," Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, vol. 161, no. 906, pp. 367–381, 1937. [Online]. Available: https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150
- [6] C. F. Colebrook, "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws," *Journal* of the Institution of Civil Engineers, vol. 11, no. 4, pp. 133–156, 1939. [Online]. Available: https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.13150

- [7] L. F. Moody and N. J. Princeton, "Friction factor for pipe flow," *Transaction of ASME*, vol. 66, pp. 671–684, 1944. [Online]. Available: https://bit.ly/3BRgxyL
- [8] P. K. Swamee and A. K. Jain, "Explicit equations for pipe-flow problems," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 102, no. 5, pp. 657–664, 1976. [Online]. Available: https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004542
- [9] S. E. Haaland, "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, Mar 1983. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.3240948
- [10] Y. Mikata and W. S. Walczak, "Exact analytical solutions of the Colebrook-White equation," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 142, no. 2, p. 04015050, 2016. [Online]. Available: https:// doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001074
- [11] P. Rollmann and K. Spindler, "Explicit representation of the implicit Colebrook-White equation," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 5, pp. 41–47, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.12.001
- [12] D. Biberg, "Fast and accurate approximations for the Colebrook equation," *Journal of Fluids Engi*neering, vol. 139, no. 3, Dec 2016, 031401. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.4034950
- [13] T. K. Seguides, "Estimate friction factor accurately," Chemical Engineering Journal, vol. 91, pp. 63–64, 1984. [Online]. Available: https://bit.ly/3oqUTyd
- [14] A. R. Vatankhah, "Approximate analytical solutions for the Colebrook equation," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 144, no. 5, p. 06018007, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001454
- [15] N. Azizi, R. Homayoon, and M. R. Hojjati, "Predicting the Colebrook-White friction factor in the pipe flow by new explicit correlations," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 141, no. 5, Nov 2018, 051201. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.4041232
- [16] N. H. Chen, "An explicit equation for friction factor in pipe," Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, vol. 18, no. 3, pp. 296–297, 1979. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/i160071a019

- [17] B. J. Schorle, S. W. Churchill, and M. Shacham, "Comments on: "An explicit equation for friction factor in pipe"," Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, vol. 19, no. 2, pp. 228–228, 1980. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/i160074a019
- [18] D. J. Zigrang and N. D. Sylvester, "A review of explicit friction factor equations," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 107, no. 2, pp. 280–283, 1985. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.3231190
- [19] J. Sousa, M. d. C. Cunha, and A. S. Marques, "An explicit solution of the Colebrook-White equation through simulated annealing," Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, vol. 2, pp. 347–355, 1999.
- [20] E. Romeo, C. Royo, and A. Monzon, "Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes," *Chemical Engineering Journal*, vol. 86, pp. 369–374, 04 2002. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00254-6
- [21] U. Offor and S. Alabi, "An accurate and computationally efficient explicit friction factor model," *Advances in Chemical Engineering and Science*, no. 6, pp. 237–245, 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4236/aces.2016.63024
- [22] I. Santos-Ruiz, J. R. Bermúdez, F. R. López-Estrada, V. Puig, and L. Torres, "Estimación experimental de la rugosidad y del factor de fricción en una tubería," in Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, San

- Luis Potosí, México,, 2018, pp. 489–494. [Online]. Available: https://bit.ly/3oubv8g
- [23] A. P. Olivares-Gallardo, R. A. Guerra-Rojas, and M. A. Alfaro-Guerra, "Evaluación experimental de la solución analítica exacta de la ecuación de Colebrook-White," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 2, pp. 1–11, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.021
- [24] J. R. Pérez Pupo, J. N. Guerrero, and M. Batista Zaldívar, "On the explicit expressions for the determination of the friction factor in turbulent regime," *Revista mexicana de ingeniería química*, vol. 19, pp. 313–334, 01 2020. [Online]. Available: https://bit.ly/3BUtqrD
- [25] D. Brkić and Z. Stajić, "Excel VBA-based user defined functions for highly precise Colebrook's pipe flow friction approximations: a comparative overview," FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering, vol. 19, no. 2, pp. 253–269, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.22190/FUME210111044B
- [26] P. Praks and D. Brkić, "Advanced iterative procedures for solving the implicit Colebrook equation for fluid flow friction," Advances in Civil Engineering, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2018/5451034
- [27] A. A. Lamri and S. M. Easa, "Computationally efficient and accurate solution for Colebrook equation based on Lagrange theorem," *Journal of Flu*ids Engineering, vol. 144, p. 014504, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.4051731





ESTUDIO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

STUDY FOR LOCALIZATION OF FAULT IN THE ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Roberto Gómez ¹, Diego Cabrera ¹, Pablo Robles ^{2,*}

Recibido: 01-02-2023, Recibido tras revisión: 21-04-2023, Aceptado: 22-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

En este artículo se estudia la localización de fallas en el sistema de distribución eléctrica, basándose en el procesamiento de las señales de cortocircuito. Para este análisis se propone la simulación de casos mediante el software CYME, empleando la transformada wavelet para el estudio de la señal obtenida y descompuesta. Se propone el método del árbol mínimo en expansión para que la localización de las faltas sea óptima y el tiempo de reconexión sea mínimo. Este análisis toma en cuenta la ubicación de los reconectadores en el sistema de distribución que servirán como almacenadores de información. En esta investigación se desarrolló un algoritmo de localización de fallas mediante el análisis de fenómenos transitorios, lográndose buena precisión en tiempo-frecuencia. Aplicando el método propuesto se descompone la señal en diferentes niveles obteniéndose los parámetros necesarios para determinar la distancia de la falla.

Palabras clave: detector de fallas, impedancia de cortocircuito, transformada wavelet, localización de fallas, distancia de fallas

Abstract

This article studies the location of faults in the electrical distribution system based on processing shortcircuit signals. For this analysis, the simulation of cases using the CYME software is proposed, using the Wavelet transform to study the signal obtained and decomposed. The minimum spanning tree method is proposed so that fault location is optimal and reconnection time is minimal. This analysis considers the reclosers' location in the distribution system that will serve as information repositories. In this investigation, a fault location algorithm was developed to analyse transient phenomena, achieving good precision in time frequency. Applying the proposed method, the signal is broken down into different levels, obtaining the necessary parameters to determine the distance of the fault.

Keywords: Fault detector, Short-circuit impedance, Wavelet transform, Fault location, Fault distance

Forma sugerida de citación: Gómez, R.; Cabrera, D. y Robles, P. "Estudio para la localización de fallas en sistemas de distribución eléctrica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 64-78, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.06.

^{1,*}Carrera de Ingeniería Eléctica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

²Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Autor para correspondencia ⊠: probles@ups.edu.ec.

1. Introducción

Las redes de distribución son las encargadas de suministrar energía eléctrica a los consumidores, utilizando un conjunto de elementos eléctricos tales como conductores, equipos, transformadores, protecciones y estructuras para su sujeción. En las redes de distribución existen muchos problemas ocasionados por las fallas eléctricas, por este motivo es de vital importancia conocer la ubicación de estas fallas. Las fallas pueden interrumpir el suministro de electricidad al consumidor final y hacer que la red sea inestable, reduciendo así la confiabilidad del sistema eléctrico. Todos estos problemas pueden provocar el incremento de pérdidas económicas a los consumidores, a las centrales eléctricas y a las distribuidoras de energía eléctrica [1].

De acuerdo con el estudio desarrollado en [2], más del 80 % de las interrupciones ocurridas en sistema eléctricos de potencia se deben a fallas que ocurren en los sistemas de distribución. Estas fallas son ocasionadas por muchas razones, entre estas se destacan rayos, fallas de los componentes del sistema de energía, debido al envejecimiento del equipo, y errores humanos [3]. Por lo tanto, las distribuidoras de energía eléctrica tratan de utilizar tecnologías eficientes, acciones de mantenimiento preventivas y procedimientos correctivos para reducir las tasas de fallas y sus efectos destructivos.

La adecuada ubicación de fallas eléctricas es uno de los problemas más críticos en el sistema de distribución de energía eléctrica. Localizar la falla eléctrica de forma óptima es esencial para ayudar al personal de mantenimiento eléctrico a dirigirse hacia el lugar de trabajo de forma ágil, garantizando así la reducción de los tiempos de búsqueda de la falla. Con esto se logra minimizar la duración de la interrupción, el tiempo de restauración de la energía y los costos operativos y de pérdidas comerciales por energía no suministrada a los clientes [4].

A pesar de los avances tecnológicos y la necesidad de mejorar el rendimiento y control de los procesos, en las empresas distribuidoras la mayor fuente de identificación de problemas y localización de fallas todavía siguen siendo las llamadas de los clientes afectados por las averías. Cuando ocurre una falla permanente, los gerentes del centro de operaciones identifican el alimentador y la posible zona de ocurrencia y luego se envía personal de mantenimiento a patrullar esa área para identificarla y aislarla. Este procedimiento es ineficaz en determinadas circunstancias porque el área de exploración puede ser considerablemente extensa [5].

Generalmente, se utilizan métodos basados en las componentes fundamentales de impedancia y frecuencia, ondas viajeras, conocimiento, entre otros [6], para diagnosticar y localizar fallas en los sistemas de distribución. El primer método requiere datos de medición de voltaje y corriente a frecuencia fundamental para

determinar la impedancia y estimar la ubicación de la falla, usando uno o varios puntos de medición. Este método tiene la ventaja de ser implementado a bajo costo. Aun así, tiene la desventaja de estimar múltiples ubicaciones de fallas debido a la gran cantidad de ramales que puede tener una red de distribución [7]. La técnica del conocimiento abarca métodos basados en análisis y estadísticas, dispositivos de distribución, inteligencia artificial y métodos híbridos. La aplicación del método de conocimiento requiere mediciones de voltaje v corriente en el alimentador, el estado de operación de la subestación y el interruptor del alimentador, y datos proporcionados por dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y dispositivos de protección instalados en los alimentadores [8]. El método de ondas viajeras para localización de fallas en sistemas de distribución, que se utilizará para este trabajo, se basa en la transmisión y reflexión de ondas viajeras entre los terminales de la línea y el punto de falla. Este método requiere dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y dispositivos de protección capaces de almacenar información de corriente y voltaje de operación de la red para obtener la forma de onda transitoria para la ubicación de la falla que ocurre en el sistema de distribución [9].

2. Materiales y métodos

Se han propuesto varios métodos para la localización de fallas eléctricas, pero no son fácilmente aplicables a los sistemas de distribución. Esto se debe principalmente a líneas cortas y heterogéneas, ramales laterales, tomas de carga y un menor grado de instrumentación en los sistemas de distribución.

Actualmente, los principales métodos utilizados para la localización óptima de fallas monofásicas a tierra en las redes de distribución son el método de la impedancia, la inyección S, la onda viajera y los métodos de diagnóstico de puertos [10].

Además de todos los métodos mencionados anteriormente, el empleo de un localizador de fallas es la forma más práctica y asequible para los sistemas de distribución, proporcionando así la mejor localización probable de estas fallas [11]. El localizador de fallas es un sistema que no requiere infraestructuras sofisticadas, por lo que es un método adecuado para la mayoría de los sistemas de distribución. La asignación de un localizador de fallas a las redes podría restringir el área de identificación de falla por el centro de control supervisor, por lo que el tiempo requerido para la localización disminuiría sustancialmente. Esto lleva a mejorar el tiempo de restauración y los índices de confiabilidad del servicio eléctrico. Sin embargo, el uso de localizadores de fallas en todas las ubicaciones candidatas es innecesario y costoso, por lo que se necesita un análisis rentable para determinar óptimammente

cuántos localizadores de fallas se requieren y dónde se deben ubicar para aprovecharlos al máximo [12].

La detección de fallas de alta impedancia (FAI) puede ser una función de protección en dispositivos electrónicos inteligentes en redes de distribución de energía [13]. FAI se puede definir como una falla que atrae corrientes bajas para que se disparen los dispositivos de protección convencionales, como los relés de sobrecorriente o los fusibles. Debido a la baja magnitud de la corriente de falla, la falla de alta impedancia no daña los componentes del sistema, pero es un peligro para la seguridad pública porque a menudo involucra un arco eléctrico que aumenta el riesgo de incendio [4].

A lo largo de los años, han surgido varios métodos para detectar fallas en un sistema de distribución. Mortazavi, et al. [14], presenta, un algoritmo para detectar fallas de alta impedancia mediante extracción de características basado en la transformada wavelet (TW) y una red neuronal. La extracción de las características más relevantes de la señal se obtiene de clasificar la transformada wavelet según su forma, por ejemplo, Haar, Symlet, Daubechies, Coiflet y Biorthogonal; para cada wavelet mencionada se realiza una descomposición de diferentes niveles, lo que permite el análisis para detectar una falla.

En las redes de distribución se generan diferentes tipos de fallas por cortocircuito, por lo que Guo, et al. [15] sugiere, utilizar el paquete de software CYME que permite la construcción de una red de distribución y la simulación de varias fallas por cortocircuito. Mediante Matlab - Simulink se puede descomponer y reconstruir señales en diferentes niveles utilizando

la transformada wavelet, lo que permite mejorar la velocidad de detección de fallas.

La Figura 1 representa la estructura de esta investigación. En esta Figura se muestra el escenario de diseño del sistema de la red de distribución y el análisis dinámico realizado ante la ocurrencia de una falla en uno o más nodos del sistema de estudio. Para este análisis es necesario obtener el perfil de cortocircuito y observar el proceso de la transformada wavelet, mismo que permite describir lo que sucede en el sistema para determinar las distancias de fallas y el nodo de origen cuando el sistema presenta una o varias. Los datos resultantes de este estudio permiten construir la métrica con la información crítica sobre la ubicación y comportamiento del sistema.

El análisis de estado transitorio requiere técnicas que exploten la relación entre los parámetros del sistema, la frecuencia transitoria y la velocidad de onda. Por esta razón, Magagula, et al. [16] sugiere utilizar la transformada wavelet, ya que las frecuencias altas tienen una mejor resolución en el tiempo.

Un componente de alta frecuencia se puede ubicar con menos error relativo que un componente de baja frecuencia. Por el contrario, las frecuencias bajas tienen una mejor resolución en el dominio de la frecuencia que los componentes de alta frecuencia [17]. Existen diversos métodos para la localización y cálculo de la distancia de falla en los sistemas eléctricos de potencia, entre ellos el método de la onda viajera, que se aplica en la mayoría de los casos para la localización de fallas en los sistemas de transmisión.

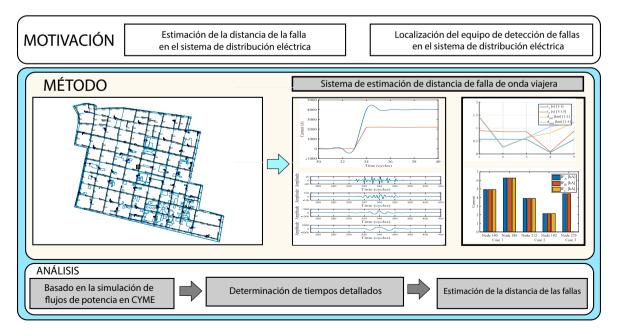


Figura 1. Figura conceptual

El diagrama de flujo se muestra en la Figura 2. Para obtener señales de fallas es necesario generar un perfil obtenido de CYME en análisis dinámico. Este perfil depende de los datos originales del sistema. Si esta información proporcionada no es correcta, es obligatorio interpolar; por lo tanto, el análisis de la transformada wavelet propone un filtro de Daubechies y de falla para determinar el tiempo y la velocidad de propagación, que es una posible estimación de la distancia de falla desde el reconectador más cercano.

En los sistemas de distribución se implementa el método de onda viajera, el cual tiene baja precisión cuando la configuración de las líneas cambia de impedancia, por lo que Li, et al. [18] propone, un método preciso de localización de fallas en la red de distribución basado en la onda viajera con múltiples puntos de medición. Para obtener múltiples puntos de medición en las redes de distribución [19], [20] utilizan relés digitales en las subestaciones, IED a lo largo de los alimentadores primarios, sensores SCADA en el circuito alimentador y medidores inteligentes en los clientes. Todos ellos tienen la propiedad de almacenar información sobre la operación de la red de distribución, obteniendo así múltiples puntos de medida.

En la Tabla 1 se expone la nomenclatura, así como la descripción de abreviaturas que se están utilizando en esta investigación. Se propone la creación del estado del arte pues es una excelente herramienta para que el investigador pueda obtener información sobre el tema y desarrollar la estructura fundamental a través de la cual se expone el posible análisis y evaluación del modelo matemático, ver Tabla 2.

Existen diversos métodos para la localización y cálculo de la distancia de falla en los sistemas eléctricos de potencia, entre ellos el método de la onda viajera, que se aplica en la mayoría de los casos para la localización de fallas en los sistemas de transmisión. En los sistemas de distribución se implementa el método de onda viajera, el cual tiene baja precisión cuando la configuración de las líneas cambia de impedancia, por lo que en [18] se propone un método preciso de localización de fallas en la red de distribución basado en la onda viajera con múltiples puntos de medición.

Además, Myint y Wichakool [21] proponen, un algoritmo para la estimación de la distancia de falla en redes de distribución usando la onda viajera transitoria y la transformada wavelet, usando las señales de onda viajera actuales de la barra de la subestación con los primeros tiempos de llegada de la componente diferencial aérea y secuencias cero. Para calcular la distancia de falla estimada se puede desarrollar el análisis utilizando la Wavelet madre DB6 y nivel 1. Sin embargo, esto es posible solo cuando se trata de fallas simétricas [22].

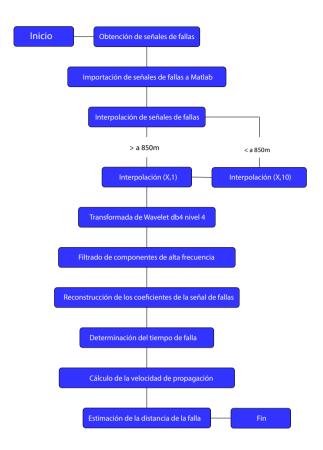


Figura 2. Diagrama de flujos

En la actualidad, las herramientas computacionales de geoprocesamiento SIG se utilizan para diseñar una red de distribución eléctrica, obteniéndose una base de datos georreferenciada en la que se aplica el algoritmo de expansión mínima (MST). Este método representa una de las herramientas matemáticas utilizadas en problemas de simulación y optimización de las redes eléctricas [23], [24]. Una base de datos georreferenciada también permite aplicar algoritmos como K-Means y Elbow para una ubicación más precisa de los dispositivos de protección [25], [26].

Como escenario de prueba y estudio se ha diseñado un sistema de red de distribución eléctrica con todos sus elementos. Esta red contiene reconectadores, subestaciones, cargas, entre otros. Con todos los datos establecidos en el diseño se asegura la correcta ejecución del flujo de potencia y se garantiza determinar el perfil de voltaje para el cliente. En la Figura 3 se puede observar una breve representación de la red de distribución eléctrica con detalles de la caída de voltaje, carga de reconectadores, carga de subestación, entre otros. Este sistema de diseño representa un caso de estudio para el análisis de fallas y permite una búsqueda prioritaria de la ubicación de nodos. Debido a que todo el sistema de estudio se encuentra geolocalizado, esto supone una estrategia de implementación mucho más realista.

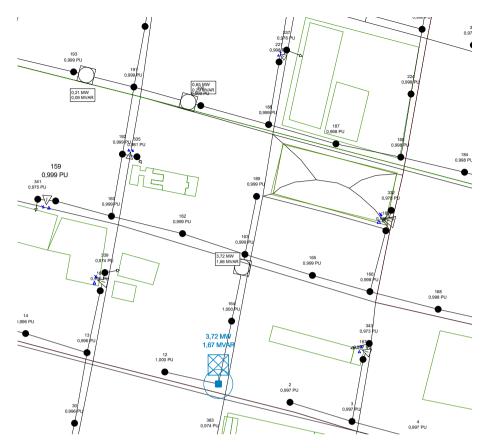


Figura 3. Breve representación de la red de distribución eléctrica (CYME)

 ${\bf Tabla~1.}$ Nomenclatura y descripción de abreviaturas

Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
f(t)	Señal de análisis	d_{real}	Distancia real medida desde la subestación hasta el nodo de falla
C	Capacitancia	$Wf(\mu, s)$	Transformada de wavelet en tiempo continuo
IF	Corriente de falla	d_f	Distancia de falla medida desde la subestación de distribución hasta el nodo de falla
HIF	Fallas de alta impedancia	FI	Indicador de falla
GIS	Sistema de información geográfica	L	Inductancia
IEDs	Dispositivos electrónicos inteligentes	MST	Árbol de expansión mínima
VLN	Voltaje de fase		
Δ_F	Frecuencia de muestreo	Z1	Impedancia de frecuencia positiva
s	Escala	I	Corriente nominal
STPC	Cortocircuito trifásico simultáneo	S/E	Subestación
SWT	Transformada wavelet estacionaria	TPSCNS	Cortocircuito trifásico cerca de la subestación
μ	Traducción de la función de wavelet en el dominio de la señal de análisis	WT	Transformada wavelet
TPSCFS	Cortocircuito trifásico lejos de la subestación	$\psi^*\left(\frac{t-\mu}{s}\right)$	Función de transformada de wavelet o función wavelet
Δ_V	Caída de voltaje	t	Tiempo
v	Velocidad de propagación de las ondas	t_d	Tiempo de detalle wavelet de la señal
Z0	Impedancia de frecuencia cero	TPSC	Cortocircuito bifásico

	Parámetros considerados		Temática						
Autor, año	Objetivos	Voltaje	Corriente	Impedancia	Distancia de la falla	Red de distribución	Cortocircuito	Wavelet	Localización de fallas
[2], 2020	Mayor precisión en la detección de fallas	\mathbf{A}	\mathbf{X}	¥	-	-	-	-	\mathbf{A}
[4], 2019	Localización de fallas en diferentes lugares	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-	-	-	\mathbf{x}
[7], 2022	Localización de fallas en sistemas de cuatro hilos	\maltese	\maltese	-	¥	\maltese	-	-	\maltese
[9], 2020	Detección de fallas por cortocircuito	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-		-	\mathbf{x}
[10], 2020	Localización de fallas línea-tierra	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-	-	-	\mathbf{x}
[12], 2020	Localización de fallas monofásicas	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-	-	-	\maltese
[27], 2019	Minimización del error de distancia	\maltese	\maltese	\maltese	¥	\maltese	\maltese	-	\mathbf{x}
[19], 2020	Combinación de dispositivos en la red	\maltese	\maltese	-	¥	\maltese	-	-	-
[21], 2019	Parametrizar el cortocircuito	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-	-	\maltese	\maltese
[18], 2020	Método de localización de fallas	\maltese	\maltese	\maltese	¥	-	-	-	\maltese
Trabajo actual	Localización de fallas	-	\maltese	\mathbf{x}	¥	\mathbf{X}	\maltese	\maltese	\maltese

Tabla 2. Resumen de artículos relacionados con equipos de detección de fallas

2.1. Formulación del problema y metodología

Se presentan casos de estudio que contienen fallas en el sistema de distribución eléctrico que son identificadas por el método de la transformada wavelet. La adquisición de una base de datos que describa el funcionamiento del sistema en estado dinámico se realiza en el software CYME. Este software permite simular la estabilidad transitoria del sistema con sus respectivas características adquiridas por el método de identificación. Para esto, los datos deben contener como variable fundamental la información del comportamiento actual de la falla y esta debe ser interpolada si la distancia es menor a 850 metros, que es el umbral para tener un mejor muestreo de la señal.

El método de la onda viajera calcula la distancia de falla considerando un sistema sin cambio de impedancia homopolar positiva. Las redes de distribución están sujetas a fallas de diferente origen o naturaleza. Estas fallas afectan los componentes de la red eléctrica, generando perturbaciones en su correcto funcionamiento y transitorios en las señales de corriente y voltaje. Por lo tanto, es necesario identificar cuando

ocurre una falla usando la transformada wavelet.

La transformada wavelet es una herramienta efectiva para la identificación de fallas debido a su funcionalidad para procesar y analizar señales transitorias. La TW se puede utilizar para obtener información simultánea sobre el tiempo y la frecuencia de una señal [14].

El sistema de distribución eléctrico contiene transformadores trifásicos en media tensión con potencia que varían entre 30 kVA y 200 kVA. La configuración de los conductores está propuesta con calibres 1/0 para las fases y 2 tipo ACSR para el conductor neutro.

Para una línea aérea, la ubicación de los reconectadores depende de las características del sistema, pero para esta investigación se utilizaron los indicadores de falla para definir estas ubicaciones. Otro parámetro importante es la capacidad de los conductores, esto asegura su cambiabilidad.

Todos los escenarios se encuentran geolocalizados con las condiciones óptimas para ejecutar un flujo de potencia, ver Figura 4. Los resultados encontrados se muestran en la Tabla 3 donde se pueden observar los parámetros más relevantes para cada caso de estudio.

Capacidad S/E	5 MVA
Carga total	
Poder real	$3.686 \; \mathrm{MW}$
Potencia reactiva	$2.325~\mathrm{MVAR}$
Potencia aparente	4.358 MVA
Carga utilizada	
Poder real	$3.614 \; \mathrm{MW}$
Potencia reactiva	1,534 MVAR
Potencia aparente	3,926 MVA
Pérdidas totales	0,823 MVA
Max. ΔV	2,85 %
Longitud	15899 m

Tabla 3. Características del sistema en estado normal

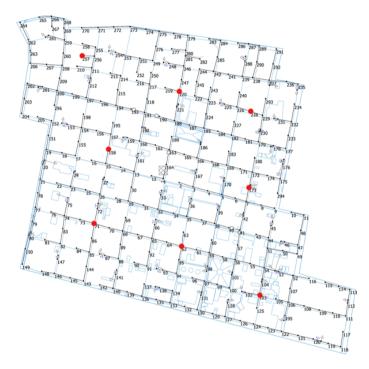


Figura 4. Escenarios

El análisis de señales mediante la transformada wavelet se basa en la dilatación y traducción de una ondícula madre en la señal. La operación de escalado dilata y comprime la ondícula madre, lo que da como resultado señales de baja y alta frecuencia, respectivamente [14].

$$W_{f(\mu,s)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * \psi_{\mu,s}(t) dt$$
 (1)

 $\psi_{\mu,s}$ se definen como las señales wavelet originales:

$$\psi_{\mu,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\mu}{s}\right) \tag{2}$$

Donde:

• s - Scala.

- μ Traducción de la función wavelet en el dominio de la señal de análisis.
- t Tiempo.

Diferentes wavelets madre están asociadas con la familia: Daubechies, Coiflets y Symmlet. Para los estudios de los casos presentados en esta investigación se utiliza el nivel 4 [dB4] de la wavelet de Daubechies.

Se propone localizar la falla utilizando el método de la onda viajera, el cual calcula la propagación de la onda y depende de los parámetros inductivos y capacitivos de la ecuación (3) obtenidos a partir de la impedancia de secuencia cero y de secuencia positiva.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L * C}} \tag{3}$$

L representa la inductancia de la línea de distribución por unidad de longitud. En contraste, C representa la capacitancia de la línea de distribución por unidad de longitud. Para cualquier caso, los parámetros pueden expresarse en kilómetros o metros; por lo tanto, la velocidad calculada se describirá en km/s o m/s. Las configuraciones de las líneas de distribución afectan la forma en que las ondas viajeras viajan a través de la red (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de la línea

Línea	L (H/km)	C (F/km)	v (km/s)
Línea 139-140	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 166-186	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 102-103	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 197-212	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 235-236	0,0011796	1,0242 E-08	287705,1614

Para calcular la distancia de falla, además de la velocidad de la señal, es necesario determinar el tiempo de la señal utilizando la longitud de onda y su frecuencia de muestreo, que es igual a 3.3 kHz.

$$d_f = \frac{t_d * \Delta_F}{2} * v \tag{4}$$

$$error(\%) = \frac{|d_f - d_{real}|}{d_{real}} * 100$$
 (5)

En la ubicación del equipo de detección de fallas llamado LF, se implementa el método del codo de Jambú para estimar la cantidad de clústeres necesarios. El algoritmo k-means permite un mejor agrupamiento de los indicadores de falla dentro de la red de distribución presentada en el caso de estudio (Tabla 5).

Para probar la efectividad del algoritmo propuesto, se diseña una red de distribución de 22 kV georreferenciada con QGIS, ver Tabla 1. Estas coordenadas se

importan a Matlab para conformar el grafo en el que se aplica el árbol de mínima expansión partiendo de un vértice raíz y encontrando todos sus nodos enlazados. Este análisis se realiza con base en las relaciones que permiten conectar los nodos, siendo el peso considerado la menor distancia [28]. Un árbol de expansión de peso mínimo es un dígrafo de borde ponderado conectado a todos los vértices sin la presencia de bucles [29], [30].

El alimentador propuesto cuenta con 295 nodos, 48 transformadores trifásicos de dos devanados cuyas potencias en kVA son 30, 50, 75, 112.5, 150 y 200, un transformador monofásico de 75 kVA, 54 cargas concentradas y cinco reconectadores trifásicos, dando como resultado un alimentador de 5 MVA de carga instalada; ver Figura 4. En la Tabla 3 se muestran los datos generales y en la Tabla 6 los casos de estudio propuestos.

Tabla 5. Información del algoritmo (pseudocódigo)

```
I: Corriente
```

T: Tiempo

C, L, Fo: Variable auxiliar

t_d: Tiempo de detalle de la señal wavelet

v: Velocidad

 d_f : Distancia de la falla

Pasos del algoritmo:

Paso 0: introducción de los datos de la corriente de cortocircuito

Paso 1: inicialización de las variables

Paso 2: datos para el cálculo del nodo de falla

 $C_s = \text{Capacitancia [F/km]}$

 $L_s = \text{Inductancia [H/km]}$

Paso 3: descomposición y reconstrucción de la señal

con la transformada wavelet [C,L] = wavedec (I,4,db4)

Save max(C)

Fo = wrcoef('d', C, L, 'db4')

Paso 4: búsqueda de los dos picos máximos después de la falla

Print t_d

Paso 5: cálculo v

Paso 6: estimación de la distancia y la localización del nodo de falla

Paso 7: estimación del porcentaje de error

Paso 8: representación gráfica de los resultados

Paso 9: fin

Tabla 6. Casos de estudio

Caso	Tipo de falla	Nodo de falla
Cortocircuito trifásico lejos y cerca de la subestación	Trifásico	140-186
Cortocircuito trifásico simultáneo	Trifásico	212 – 102
Cortocircuito bifásico	Bifásico	235

Según el caso de estudio expuesto, el punto de partida es una falla por cortocircuito trifásico en el nodo 140, a 1427 metros de la subestación de media tensión. Los datos del cortocircuito se obtienen del almacenamiento de eventos que contiene el dispositivo de protección y conmutación, que es el reconectador 41-57 con una frecuencia de muestreo de 3,3 kHz. A partir de los datos registrados se origina la forma de

onda de operación del sistema de distribución en falla, ver Figura 5.

Partiendo del mismo caso de estudio, se presenta una falla trifásica con cortocircuito cercano a la subestación a una distancia de 274.6 metros. La señal de falla se obtiene del almacenamiento de eventos por parte del dispositivo de protección y conmutación, el reconectador 163-164. Como la falla es inferior al um-

bral, se procede a interpolar para un mejor muestreo; porque no hay cambio de impedancia en las líneas de ver Figura 6.

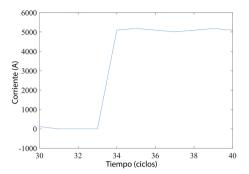


Figura 5. Cortocircuito trifásico lejos de la subestación

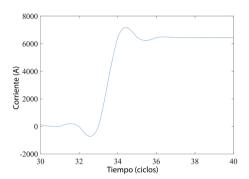


Figura 6. Cortocircuito trifásico cercano a la subestación eléctrica (CYME)

Como segundo caso se presenta un cortocircuito trifásico simultáneo. Por tanto, se tienen dos distancias, una para cada cortocircuito. La primera distancia es de 625.8 metros, inferior al umbral por lo que requiere una interpolación. La segunda distancia es de 1051.7 metros, tomada desde la subestación eléctrica. Las señales se obtienen de los reconectadores 41-57 y 191-193; ver Figura 7.

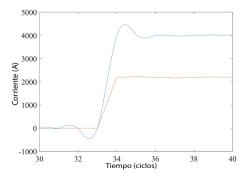


Figura 7. Cortocircuito trifásico simultáneo en dos nodos del sistema de distribución eléctrico (CYME)

Ocurre una falla bifásica dentro de la zona del reconectador 190-191 a 1219 metros de la subestación. En este caso, las corrientes de falla son simétricas

distribución, ver Figura 8.

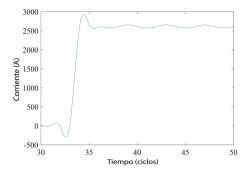


Figura 8. Cortocircuito bifásico (CYME)

3. Resultados v discusión

Se utiliza una transformada wavelet de la familia Db4 v orden 4 a partir de las señales de fallas obtenidas de cada caso. La señal se reconstruve usando el nivel máximo basado en la estructura de descomposición de la wavelet.

Los detalles de las señales para todos los casos son similares con la variación en su amplitud debido al número de coeficientes calculados. Una de las variables esenciales para aplicar el método de la onda viajera y la posterior localización de la falla es el tiempo exacto (td). Este tiempo resulta de la diferencia entre los dos picos (valor RMS) consecutivos en el instante de la falla, el cual se calcula para cada uno de los casos.

Para la aplicación del algoritmo de localización e identificación de fallas es necesario determinar el tiempo (td) para cada caso de estudio. Este tiempo será similar para cada tipo de falla y se puede obtener de la señal presentada en la Figura 9, la cual corresponde al análisis de la identificación de la falla distante de la subestación que fue ubicada en el nodo 140.

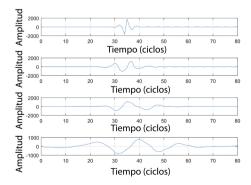


Figura 9. Detalle de la señal de wavelet para calcular el tiempo de fallas lejos de la subestación. Amplitud en amperios vs. TW del orden 4

Ahora bien, para la falla que ocurre en el nodo 186 ubicado cerca de la subestación, la información de la

base de datos obtenida por el reconectador es interpolada debido a la poca cantidad de datos. Esto permite una mejor señal a analizar para la identificación de fallas y determinación del tiempo td, Figura 10.

Se analiza la ocurrencia de dos fallas simultáneas, una ubicada en el nodo 212 y la segunda en el nodo 102, donde estas pertenecen a las zonas de los reconectadores 41-57 y 191-193 respectivamente. De estas fallas se obtuvieron dos bases de datos diferentes en las que se realizó un análisis independiente para cada señal con el objetivo de identificar dónde ocurrió la falla y de determinar los tiempos td de cada señal de falla. Estos resultados se presentan en las Figuras 11 y 12.

La Figura 13 muestra el detalle de la señal de wavelet con la cual se obtiene el tiempo td para calcular la distancia en el caso de la falla bifásica que ocurre en la zona del reconectador 190-191.

Una vez identificada la ocurrencia de la falla y la distancia estimada desde su origen, se implementa el método del codo de Jambú para determinar el número requerido de localizadores de fallas a instalar en la red de distribución de estudio. El resultado del método del codo de Jambú se presenta en la Figura 14.

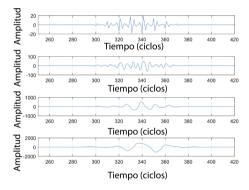


Figura 10. Detalle de la señal de wavelet para calcular el tiempo de fallas cercanas a la subestación. Amplitud en amperios vs. TW del orden 4

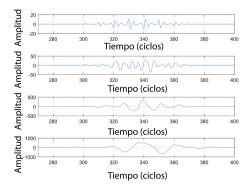


Figura 11. Detalle de la señal de wavelet para el cálculo del tiempo de falla 1. Amplitud en amperios vs. TW del orden 4

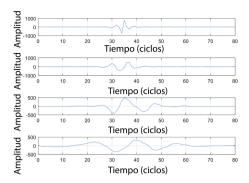


Figura 12. Detalle de la señal de wavelet para el cálculo del tiempo de falla 2. Amplitud en amperios vs. TW del orden 4

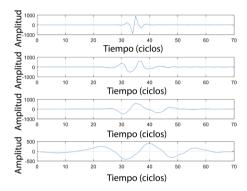


Figura 13. Detalle de la señal de wavelet para el cálculo del tiempo para el cortocircuito bifásico. Amplitud en amperios vs. TW del orden 4

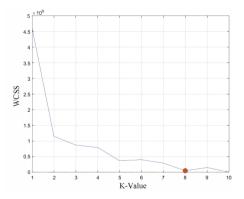


Figura 14. Método del codo para localizar equipos de detección de fallas

El método k-means permite obtener la ubicación óptima donde se debe instalar cada localizador de falla. La Figura 5 muestra la ubicación óptima de los 8 localizadores de falla, representados por puntos rojos.

Para comprobar que el algoritmo desarrollado estima correctamente la distancia de la falla, se presenta la Tabla 7, la cual indica los resultados obtenidos en las pruebas para cada caso. De estos resultados, se puede evidenciar que los valores de distancia de falla

calculados en comparación con las distancias reales de fallas presentan un margen de error inferior al 30 %, por lo tanto, se pueden considerar satisfactorios.

El cálculo de la distancia depende directamente del tiempo exacto de la falla. En la Figura 15 se muestra como la curva de distancia calculada también varía ante cambios en las curvas de los tiempos t1 y t2. En esta misma Figura se ve que la curva de distancia calculada es similar a la curva de distancia real, resultado que valida la factibilidad del método.

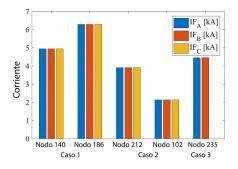


Figura 15. Corriente de falla del nodo

Tabla 7. Resultados obtenidos después de la ocurrencia de la falla

Casos	Tipo de falla	$t_1(\mathbf{s})$	$t_2(\mathbf{s})$	$d_{cal}(\mathbf{km})$	$d_{real}(\mathbf{km})$	error(%)	Nodo
Caso 1	TPSCFS TPSCNS	$0,5667 \\ 0,5649$	$0,6 \\ 0,5715$	$\begin{array}{c} 1,4531 \\ 0,28413 \end{array}$	1,427 $0,2476$	1,8626 $3,4701$	140 186
Caso 2	STPC STPC	$0,5649 \\ 0,0567$	0, 0,5715 0,06	$0,62706 \\ 0,80768$	0,6258 $1,0517$	$0,2 \\ 23,202$	212 102
Caso 3	TPSC	0,5649	0,5849	1,2117	1,219	0,5963	235

En la Tabla 9 se muestran la corriente nominal y la corriente de cortocircuito para cada nodo donde ocurre la falla. La Figura 14 muestra la corriente de falla para cada nodo, mientras que la corriente nominal para cada nodo se muestra en la Figura 17.

En la Figura 16 se puede evidenciar que el nodo 212, que se encuentra distante de la subestación, presenta la máxima corriente nominal del sistema porque tiene una mayor cantidad de carga conectada. Por el contrario, el nodo 102 posee la corriente nominal más pequeña dentro del sistema de estudio debido a que este nodo tiene conectada una pequeña carga. En el caso de la Figura 15, se observa que la máxima corriente de falla se presenta en el nodo 186 cercano a la subestación y con una gran cantidad de carga conectada, mientras que el nodo 102 nuevamente se presenta la mínima corriente de falla por la misma razón de tener una carga menor conectada.

Los voltajes en los nodos del sistema de distribución eléctrica varían dependiendo de la distancia a la que se encuentran ubicados estos nodos con respecto a la subestación eléctrica. A mayor distancia de la subestación mayor es la caída de voltaje en ese recorrido. La Tabla 8 muestra los valores del voltaje nominal y del voltaje de falla para cada caso de estudio.

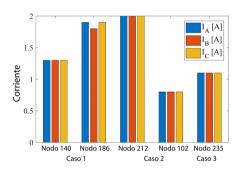


Figura 16. Corriente nominal por nodos

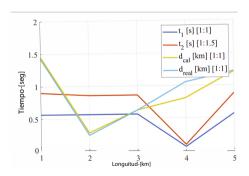


Figura 17. Detalle del tiempo por distancias reales y calculadas

		Voltaje de fase nominal		Volta	aje de fase de	falla	
		VLNA (kV)	VLNB~(kV)	VLNC (kV)	VLNA (kV)	VLNB (kV)	VLNC~(kV)
Caso 1	140 186	12.671717 12.692277	12.671717 12.692277	12.671717 12.692277	0.0017369 0.0002725	0.0017369 0.0002725	$\begin{array}{c} 0.0017369 \\ 0.0002725 \end{array}$
Caso 2	212 102	12.692948 12.673058	12.692948 12.673058	12.692948 12.673058	0.0016125 0.0007874	0.0016125 0.0007874	$\begin{array}{c} 0.0016125 \\ 0.0007874 \end{array}$
Caso 3	235	12.691229	12.691229	12.691229	6.3432678	6.3432678	12.709157

Tabla 8. Voltajes nominales y voltajes de fallas

En la Figura 18 se analizan los valores de voltaje para cada fase en kV. De esta Figura se puede evidenciar cómo los voltajes en cada nodo varían en función de la distancia a la que estos nodos se encuentran

con respecto a la subestación. La Figura 19 muestra cómo el voltaje de falla de cada fase varía según las características de la falla (Tabla 9).

Tabla 9. Corrientes de fallas y corrientes nominales

Casos	Nodos	$IF_A(\mathbf{kA})$	$IF_B(\mathbf{kA})$	$IF_C(\mathbf{kA})$	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)
Caso 1	140	4,9372	4,9372	4,9372	1,3	1,3	1,3
	186	6,2784	6,2784	6,2784	1,9	1,8	1,9
Caso 2	212	3,9035	3,9035	3,9035	2	2	2
	102	2,1351	2,1351	2,1351	0,8	0,8	0,8
Caso 3	235	4,4482	4,4482	0	1,1	1,1	1,1

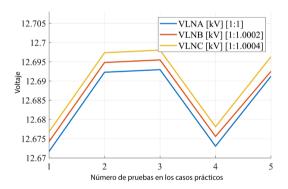


Figura 18. Voltaje nominal del nodo

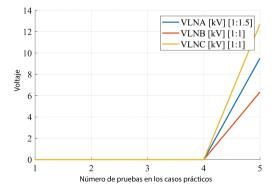


Figura 19. Voltaje de falla por nodos

3.1. Discusión

El rendimiento del algoritmo de localización de fallas basado en la transformada wavelet y la velocidad de propagación de la onda viajera dependen de la configuración de las líneas del sistema de distribución y la ubicación de la falla. Cuando el diseño de las líneas no presenta cambio de impedancia, el algoritmo muestra un excelente desempeño en el cálculo de la distancia de falla, por lo que la ubicación del punto de falla es más precisa. Cuando la configuración de las líneas presenta cambios de impedancia es necesario que el alimentador cuente con IED y equipos de protección instalados en múltiples nodos para tener más información sobre la ocurrencia de las fallas, lo que permite que el algoritmo presente un mayor rendimiento.

Se realizaron varias simulaciones con ocurrencias de fallas lejos y cerca de la subestación. Las fallas que ocurrieron a distancias mayores a 850 m no requieren interpolación de los datos, mientras que las fallas cercanas a la subestación deberán interpolarse. Ante esta hipótesis se determinó que el umbral de interpolación es de 850 m.

Es necesario realizar un análisis preciso de la ubicación de la falla, porque en la red de distribución pueden existir distancias iguales basadas en los equipos de protección y maniobra, como los reconectadores. Esto permite la zonificación y reduce el margen de error en la localización de las fallas. Sin embargo, incluso con el análisis por zona de reenganche, todavía pueden existir distancias iguales hasta el punto de la falla. Por lo tanto, se propone la ubicación de un dispositivo localizador de falla (LF) para lograr una ubicación precisa de la falla. Esto permitirá visualizar de manera clara qué sección de la línea de distribución está afectada por la falla.

4. Conclusiones

La localización de fallas en los sistemas de distribución eléctrica es fundamental para mejorar su confiabilidad y reducir el tiempo de interrupción del servicio eléctrico; en este artículo se relaciona la transformada Wavelet con la onda viajera para proponer un método de localización de fallas.

La caracterización del sistema de distribución muestra que la variación de los parámetros de las líneas influye en el cálculo de la velocidad de la onda viajera a los diferentes equipos de protección instalados en el alimentador, cuya frecuencia de muestreo varía según la marca y modelo.

Para calcular la distancia de la falla de manera precisa, es crucial seleccionar adecuadamente la función madre de la transformada wavelet. Esta elección nos permitirá identificar de manera óptima los dos picos máximos posteriores a la falla, lo que nos dará una estimación aproximada de la distancia. Es importante tener en cuenta que esta aproximación puede tener un margen de error permisible de hasta un 30 %.

La señal de falla capturada por los dispositivos de protección de la red puede provenir tanto de equipos cercanos como lejanos a la subestación. En caso de que los datos disponibles para construir la señal de falla sean limitados y no permitan obtener una señal suavizada, es necesario realizar una interpolación para ampliar la base de datos y obtener una aproximación más precisa de la falla. En el marco de este estudio, se han llevado a cabo pruebas que demuestran que la distancia óptima es de 850 metros.

La metodología implementada en este estudio de caso ha permitido la localización precisa de fallas en el sistema de distribución mediante el análisis de las señales de corriente de cortocircuito registradas por los reconectadores cercanos a la ubicación de la falla. Es crucial identificar correctamente los coeficientes de detalle, ya que estos coeficientes tienen un impacto directo en el cálculo de la distancia de la falla. Además, es importante tener en cuenta que la duración de la falla también influye en este cálculo. Es importante destacar que la metodología propuesta es aplicable únicamente en escenarios donde no se produzcan cambios significativos de impedancia en las líneas de distribución.

Para la cuantificación de los equipos detectores de fallas, se empleó el método del codo de Jambú. Este método se utiliza para implementar el algoritmo de k-means, el cual permite ubicar los equipos detectores de fallas en nodos estratégicos.

Referencias

- R. Dashti, M. Daisy, H. R. Shaker, and M. Tahavori, "Impedance-based fault location method for four-wire power distribution networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1342–1349, 11 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778427
- [2] M. Gholami, A. Abbaspour, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using pmu-based state estimation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, pp. 1396–1406, 3 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2937944
- [3] S. Gururajapathy, H. Mokhlis, and H. Illias, "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 949–958, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021
- [4] S. H. Mortazavi, Z. Moravej, and S. M. Shahrtash, "A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, pp. 438–447, 4 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2874879
- [5] R. Dashti, M. Daisy, H. Mirshekali, H. R. Shaker, and M. Hosseini Aliabadi, "A survey of fault prediction and location methods in electrical energy distribution networks," *Measurement*, vol. 184, p. 109947, 2021. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109947
- [6] M. Dashtdar, "Fault location in distribution network based on fault current analysis using artificial neural network," *International Journal* of *Electrical and Computer Sciences (IJECS)*, vol. 1, pp. 18–32, 10 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.33544/MJECE.V1I2.75
- [7] J. Tavoosi, M. Shirkhani, A. Azizi, S. Ud Din, A. Mohammadzadeh, and S. Mobayen, "A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique," *Electric Power Systems Research*, vol. 210, p. 108073, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108073
- [8] M. Azeroual, Y. Boujoudar, K. Bhagat, L. El Iysaouy, A. Aljarbouh, A. Knyazkov, M. Fayaz,

- M. S. Qureshi, F. Rabbi, and H. El Markhi, "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: Kenitra City (Morocco) as a case study," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 108026, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108026
- [9] Z. Jianwen, H. Hui, G. Yu, H. Yongping, G. Shuping, and L. Jianan, "Single-phase ground fault location method for distribution network based on traveling wave time-frequency characteristics," *Electric Power Systems Research*, vol. 186, p. 106401, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106401
- [10] J. Liang, T. Jing, H. Niu, and J. Wang, "Two-terminal fault location method of distribution network based on adaptive convolution neural network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54 035–54 043, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980573
- [11] P. Mršić, C. Zeljković, D. Lekić, B. Erceg, P. Matić, S. Zubić, and P. Balcerek, "Minimization of power interruption time in mv distribution networks with fault locators based on optimal placement of fault passage indicators," in 2018 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), Nov 2018, pp. 1–7. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/INDEL.2018.8637620
- [12] X. Wang, H. Zhang, F. Shi, Q. Wu, V. Terzija, W. Xie, and C. Fang, "Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, pp. 774–785, 1 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2938667
- [13] W. C. Santos, F. V. Lopes, N. S. Brito, and B. A. Souza, "High-impedance fault identification on distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, pp. 23–32, 2 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2548942
- [14] S. Silva, P. Costa, M. Gouvea, A. Lacerda, F. Alves, and D. Leite, "High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 474–483, 1 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2017.08.039
- [15] M. F. Guo, N. C. Yang, and L. X. You, "Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99,

- pp. 706-721, 7 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2018.01.013
- [16] X. G. Magagula, Y. Hamam, J. A. Jordaan, and A. A. Yusuff, "A fault classification and localization method in a power distribution network," 2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017, pp. 1337–1343, 11 2017. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095676
- [17] Z. Jianwen and D. Jiaxin, "Traveling wave fault location for lines combined with overhead-lines and cables based on empirical wavelet transform," 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering, ICECE 2019, pp. 285–289, 12 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICECE48499.2019.9058522
- [18] P. Li, X. Liu, Z. Yuan, W. Chen, L. Yu, Q. Xu, and Y. Lin, "Precise fault location method of traveling wave in distribution grid based on multiple measuring point," 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020, pp. 1867–1872, 10 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9346873
- [19] A. Silos-Sánchez, R. Villafafila-Robles, and P. Lloret-Gallego, "Novel fault location algorithm for meshed distribution networks with ders," *Electric Power Systems Research*, vol. 181, p. 106182, 4 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2019.106182
- [20] Y. Jiang, "Data-driven probabilistic fault location of electric power distribution systems incorporating data uncertainties," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, pp. 4522–4534, 9 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3070550
- [21] S. Myint and W. Wichakool, "A traveling wave-based fault section and fault distance estimation algorithm for grounded distribution systems," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019, pp. 472–477, 5 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/GTDASIA.2019.8715933
- [22] C. Zhang, G. Song, T. Wang, and L. Yang, "Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, pp. 2028–2038, 10 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2922654

- [23] W. Pavón, E. Inga, and S. Simani, "Optimal routing an ungrounded electrical distribution system based on heuristic method with micro grids integration," Sustainability, vol. 11, no. 6, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su11061607
- [24] M. A. Alotaibi and M. M. A. Salama, "An incentive-based multistage expansion planning model for smart distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 5469–5485, Sep. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2805322
- [25] A. Valenzuela, E. Inga, and S. Simani, "Planning of a resilient underground distribution network using georeferenced data," *Energies*, vol. 12, p. 644, 2 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/EN12040644
- [26] M. A. Syakur, B. K. Khotimah, E. M. S. Rochman, and B. D. Satoto, "Integration k-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 336, p. 012017, apr 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088/1757-899x/336/1/012017
- [27] F. M. Aboshady, D. W. Thomas, and M. Sumner, "A new single end wideband impedance

- based fault location scheme for distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 173, pp. 263–270, 8 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2019.04.034
- [28] M. Mosbah, S. Arif, R. D. Mohammedi, and A. Hellal, "Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm," in 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), Oct 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8192170
- [29] A. Guamán and A. Valenzuela, "Distribution network reconfiguration applied to multiple faulty branches based on spanning tree and genetic algorithms," *Energies*, vol. 14, no. 20, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en14206699
- [30] G. Michau, N. Pustelnik, P. Borgnat, P. Abry, A. Nantes, A. Bhaskar, and E. Chung, "A primal-dual algorithm for link dependent origin destination matrix estimation," *IEEE Transactions on Signal and Informa*tion Processing over Networks, vol. 3, no. 1, pp. 104–113, March 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSIPN.2016.2623094





RED NEURONAL ARTIFICIAL EVOLUTIVA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UN REACTOR BATCH DE POLIMERIZACIÓN

EVOLUTIONARY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR TEMPERATURE CONTROL IN A BATCH POLYMERIZATION REACTOR

Francisco Javier Sánchez-Ruiz^{1,*}, Elizabeth Argüelles Hernández¹, José Terrones-Salgado¹, Luz Judith Fernández Quiroz¹

Recibido: 06-03-2023, Recibido tras revisión: 08-05-2023, Aceptado: 29-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

La integración de técnicas de inteligencia artificial introduce nuevas perspectivas en la aplicación de estos métodos. Este trabajo presenta la combinación de redes neuronales y estrategias evolutivas para crear lo que se conoce como redes neuronales artificiales evolutivas (RNAE). Durante el proceso, se modificó la función de excitación de las neuronas para permitir su reproducción asexual. Como resultado, las neuronas evolucionaron y se desarrollaron significativamente. La técnica del controlador de temperatura de un reactor de polimerización por lotes para producir polimetilmetacrilato (PMMA) mediante radicales libres se comparó con dos controles diferentes (PID v GMC), demostrando así la aplicabilidad de los controladores basados en inteligencia artificial. Estos controladores ofrecen mejores resultados que los controladores convencionales sin crear funciones de transferencia al proceso de control representado.

Palabras clave: RNA, redes neuronales evolucionadas, lote de reactores, función de excitación, PMMA

Abstract

The integration of artificial intelligence techniques introduces fresh perspectives in the implementation of these methods. This paper presents the combination of neural networks and evolutionary strategies to create what is known as evolutionary artificial neural networks (EANNs). In the process, the excitation function of neurons was modified to allow asexual reproduction. As a result, neurons evolved and developed significantly. The technique of a batch polymerization reactor temperature controller to produce polymethylmethacrylate (PMMA) by free radicals was compared with two different controls, such as PID and GMC, demonstrating that artificial intelligencebased controllers can be applied. These controllers provide better results than conventional controllers without creating transfer functions to the control process represented.

Keywords: ANNs, Evolved Neural Networks, Reactor Batch, Function Excitation, PMMA

Forma sugerida de citación: Sánchez-Ruiz, F.; Argüelles Hernández, E.; Terrones-Salgado, J. y Fernández Quiroz, L. "Red neuronal artificial evolutiva para el control de temperatura en un reactor batch de polimerización," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 79-89, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.07.

¹,*Laboratorio de Investigación Biotecnoambiental, Grupo de Investigación de Bioenergía e Inteligencia Artifcial, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México.

Autor para correspondencia [™]: franciscojavier.sanchez@upaep.mx.

1. Introducción

Las redes neuronales artificiales son sistemas basados en las capacidades cognitivas y de resolución de problemas del cerebro humano. Sin embargo, la robustez de las redes neuronales artificiales es mayor que la del cerebro humano. Los sistemas basados en inteligencia artificial y redes neuronales artificiales (RNA) presentan un sobreaprendizaje de la dinámica del proceso, característica que se asemeja a la adaptabilidad del cerebro humano [1–4].

Existen diversos tipos de redes neuronales y la elección de un tipo específico depende de las características deseadas de la red y de los requisitos particulares del proceso. Por consiguiente, la red que ofrece una mayor robustez suele ser la configuración más adecuada. Sin embargo, al igual que el cerebro humano [5–9], las redes neuronales artificiales también pueden mostrar un aprendizaje no ajustable, conocido como sobreaprendizaje. Como parte de su ajuste, la red neuronal utiliza valores calculados que no representan con exactitud el sistema, lo cual es un aspecto crucial para la investigación sobre redes neuronales artificiales. La búsqueda de una red neuronal capaz de mitigar el sobreaprendizaje ha traído consigo el desarrollo de diversas redes neuronales artificiales. Estos nuevos tipos de redes neuronales combinan distintas técnicas de inteligencia artificial, como la lógica difusa, los algoritmos evolutivos y las técnicas de optimización (métodos estocásticos), con el fin de mejorar la respuesta y el rendimiento general de la red neuronal [10–14].

Una red neuronal artificial se puede utilizar para el reconocimiento de patrones e imágenes o como controlador. En este trabajo, se utiliza una red neuronal artificial combinada con una técnica de evolución para crear una red neuronal artificial evolutiva, conocida como control neuroevolutivo [15].

En este estudio se realiza una comparación entre las funciones de excitación utilizadas en los controladores neuroevolutivos y los controles convencionales, como el PID y el GMC. Los resultados obtenidos demuestran que los sistemas basados en inteligencia artificial y redes neuronales evolutivas proporcionan un mejor ajuste que los sistemas de control tradicionales, como el PID, así como los no convencionales, como el GMC. Este estudio resalta un nuevo aspecto de la aplicación de sistemas inteligentes en el control de procesos con dinámicas impredecibles [16–18].

2. Materiales y métodos

Las características de un controlador de red neuronal evolutiva se centran en una red neuronal artificial que incluye una función de representación neuronal basada en los pesos de entrada (valores x_i) y una función de excitación σ . Esta última función permite propagar los

pesos a los valores máximos y mínimos [19–22] (véase ecuación (1)).

$$y = \sigma \left(w_0 + \sum_{i=1}^n w_i x_i \right) \tag{1}$$

Donde w_0 representa el valor del peso inicial, el cual puede reemplazar el papel de la función de excitación (σ) para minimizar el error y así evitar el sobreaprendizaje. La Figura 1 muestra el esquema de la estructura principal de una red neuronal artificial.

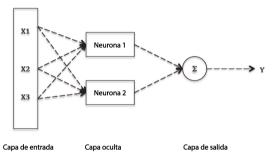


Figura 1. Estructura básica de las redes neuronales artificiales (RNA)

El controlador de red neuronal no requiere la linealización del modelo de acuerdo con una ley matemática de control determinada. Esto se debe principalmente a que la red neuronal artificial primero linealiza el modelo evolutivo para representar adecuadamente la dinámica del proceso. La Figura 2 muestra el funcionamiento de un controlador de red neuronal [23].

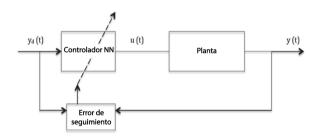


Figura 2. Controlador de red neuronal

La respuesta del control basado en redes neuronales evolutivas emplea algoritmos evolutivos que sientan las bases de la evolución de la red neuronal y modifican la red neuronal básica.

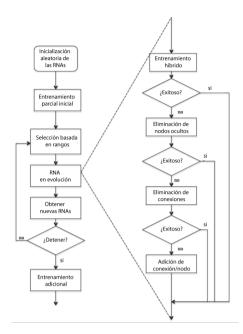
Cuando se emplean los tres métodos de evolución en una red neuronal, es necesario comprender que la red neuronal funciona de forma dinámica. En este caso solo se utilizan las dos primeras técnicas de evolución y esto se debe principalmente a que se emplea una red neuronal estática. La red neuronal no modifica sus pesos estáticos ni sus interconexiones neuronales,

sino que evoluciona generando nuevas neuronas para almacenar información [24].

La implementación de las técnicas en una red neuronal evolutiva implica utilizar un algoritmo evolutivo siguiendo una serie de pasos establecidos. La Figura 3 representa las etapas secuenciales involucradas en la creación de la estructura de una red neuronal artificial evolutiva. La etapa inicial del proceso de estructuración se basa en la obtención de los pesos sinápticos, los cuales pueden adquirirse mediante un proceso supervisado o no. En el caso de modelos no lineales como los reactores de fermentación, los valores se obtienen a través de un algoritmo no supervisado que se basa en las variables del modelo matemático (T, P, crecimiento de la levadura, concentración, etc.) obtenidas a partir de la solución. Teniendo en cuenta el modelo matemático, los pesos se utilizan en el proceso de entrenamiento de la red neuronal, que se combina con el algoritmo de evolución. Este ciclo se repite hasta encontrar la estructura más adecuada (fenotipo de la red neuronal evolucionada), lo que indica que el sistema puede seguir evolucionando. Si las variables de control experimentan perturbaciones, se realizan los ajustes mediante el proceso evolutivo de la misma estructura de la red neuronal artificial evolucionada. Esto se consigue mediante la aplicación del método de evolución, que consiste en analizar los valores de los pesos entrenados para obtener una nueva generación de neuronas evolucionadas que puedan adaptarse eficazmente a la dinámica del sistema y lidiar con las perturbaciones [25].

La configuración de un sistema de control mediante el uso de redes neuronales evolutivas comienza con la arquitectura de una red neuronal primaria. Esta arquitectura está formada por una neurona de entrada, una neurona en la capa oculta y una neurona en la capa de salida, y se configura basándose en el conocimiento previo de que la variable a controlar es únicamente la temperatura del reactor de polimerización [26].

Una vez creada, la arquitectura básica se establece como progenitora para cada neurona (ecuación (2)).



 ${f Figura~3.}$ Diagrama de flujo de la estructura principal de la RNAE

$$P_A = (\nabla \cdot \sigma_i w_i + y_t) - E_i \tag{2}$$

Donde σ_i representa la función de excitación, w_i denota los pesos sinápticos (entrada), y_t representa la serie temporal de pesos sinápticos propagados, y e_i representa el error de entrenamiento.

Las expansiones de peso y la función de excitación se representan en las siguientes ecuaciones, las cuales muestran cómo los pesos pueden expandirse en tres dimensiones. Esto permite a la red neuronal propagar la información de una manera muy similar al funcionamiento del cerebro humano [14], (ecuación (3) y ecuación (4)).

El progenitor se representa como: (ecuación (5)).

$$\nabla \cdot \sigma_i w_i = \frac{\partial(\sigma_i w_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_i w_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_i w_i)}{\partial z}$$
 (3)

$$\nabla \cdot \sigma_i w_i = \sigma_i \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial w_i}{\partial x} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial w_i}{\partial y} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) + w_i \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial \sigma_i}{\partial x} \sum_{i=1}^n \frac{\partial \sigma_i}{\partial y} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \sigma_i}{\partial y} \right)$$
(4)

$$P_{A} = \left[\left(\sigma_{i} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial x} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial y} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial y} \right) + w_{i} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial x} \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial y} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial y} \right) \right] + \\ + y_{t} P_{A} = \left[\left(\sigma_{i} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial x} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial y} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial w_{i}}{\partial y} \right) + w_{i} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial x} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial y} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial \sigma_{i}}{\partial y} \right) + y_{t} \right] - E_{i}$$

$$(5)$$

El sistema se utilizó para estudiar tres funciones de excitación distintas: la función tangencial (ecuación (6)), la función logarítmica (ecuación (7)) y la función de base radial (ecuación (8)).

$$\sigma_i = \frac{exp(-\phi \cdot w_i) + \phi exp(\phi \cdot w_i)}{exp(-\phi \cdot w_i) - exp(\phi \cdot w_i)}$$
(6)

$$\sigma_i = \frac{1}{1 + exp(-\phi \cdot w_i)} \tag{7}$$

$$\sigma_i = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|w - w_{ci}\|)$$
 (8)

Donde $\sum_{i=1}^{n} w_i$ representa la pendiente de la función de excitación y w_i los pesos de entrada de la red neuronal. Los pesos de entrada de la red neuronal artificial pueden obtenerse generalmente a partir de un modelo de referencia o a través de los datos experimentales del sistema a comprobar.

La evolución de la red neuronal se logra utilizando la ecuación de reproducción del progenitor, que abarca los estados evolutivos y las técnicas para evolucionar (ecuación (9)).

$$P_{A_{n+i}} = P_{A_{S,i}} + \eta_i \nabla \times \left(P_{A_{T,i}} - P_{A_{S,i}} \right) \tag{9}$$

Donde S y T representan cada uno de los progenitores seleccionados y η_i denota un número aleatorio uniforme entre cero y la unidad [15]. Para el entrenamiento de la red neuronal se utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM). Este método de entrenamiento acelerado es capaz de funcionar simultáneamente como un entrenamiento por descenso de gradiente y como un entrenamiento Quasi-Newton (BFGS). El entrenamiento LM utiliza el método Newton, que se basa en la expansión de la serie de Taylor de segundo orden para obtener la matriz hessiana de los pesos de la red. Después de obtener la matriz hessiana, se aproxima una matriz jacobiana, siguiendo varios pasos de entrenamiento [26]. El método LM con el factor de escala μ_k se puede expresar de la siguiente manera (ecuación (10):

$$W_{k+1} = W_k - \begin{bmatrix} J^T(W_k) \cdot J(W_k) + \mu_k \cdot I \end{bmatrix}^{-1} \cdot J^T(W_k) \cdot e(w_k)$$
(10)

Donde J (wk) representa la matriz jacobiana, I representa la matriz de identidad y e(wk) denota el error de peso sináptico.

El modelo de redes neuronales se aplica al modelo evolutivo de un reactor de polimerización que utiliza radicales libres de metilmetacrilato (MMA) para producir polimetilmetacrilato (PMMA). El modelo matemático incluye balances de masa, energía y ecuaciones cinéticas. Este modelo proporciona un enfoque directo para implementar el control mediante redes neuronales, lo cual aplica también para las reglas necesarias para obtener las leyes de control de los controladores GMC y PID [27].

Balance de masa, ecuaciones (11) y (12):

$$\frac{dCm}{dt} = -\left(K_{p0} + k_{fm}\right)C_m\xi_0\tag{11}$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -k_d C_i \tag{12}$$

Balance de energía, ecuaciones (13) y (14):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(-\Delta H_r)R_p}{Cp \ \rho_{mix}} - \frac{UA(T - T_J)}{C_p V \ \rho_{mix}} \tag{13}$$

$$\frac{dT_J}{dt} = \frac{(T_{JSP-T_J})}{\tau_I} + \frac{UA(T-T_J)}{C_{r_I}V_I\rho_I} \tag{14}$$

Ecuaciones cinéticas ((15) a la (25))

$$k_d = 1.58 \times 10^{15} exp\left(\frac{-1.2874 \times 10^5}{RT}\right)$$
 (15)

$$k_{P0} = 7.0 \times 10^6 exp\left(\frac{-2.6334 \times 10^4}{RT}\right)$$
 (16)

$$k_{fm} = 4.661 \times 10^9 exp\left(\frac{-7.4479 \times 10^4}{RT}\right)$$
 (17)

$$k_{fs} = 1.49 \times 10^9 exp\left(\frac{-6.6197 \times 10^4}{RT}\right)$$
 (18)

$$k_{\theta p} = 3.0233 \times 10^{13} exp\left(\frac{-1.1700 \times 10^5}{RT}\right)$$
 (19)

$$k_{\theta t} = 1.4540 \times 10^{20} c_{i,0} \ exp\left(\frac{-1.4584 \times 10^5}{RT}\right)$$
 (20)

$$k_p = \frac{k_{p0}}{\left(1 + \frac{k_{p0}}{Dk_{\theta p}}\right)} \tag{21}$$

$$k_t = \frac{k_{t0}}{\left(1 + \frac{k_{t0}}{Dk_{\theta t}}\right)} \tag{22}$$

$$D = exp \left[\frac{2.303(1 - \phi_p)}{0.168 - 8.21 \times 10^{-6} (T - 387)^2 + 0.03(T - \phi_p)} \right]$$
(23)

$$\phi_p = \frac{\mu_1 M W_m}{\rho_p} \tag{24}$$

$$k_{fm} = Z_{fm} \, exp\left(\frac{-E_{fm}}{RT}\right) \tag{25}$$

La implementación de un sistema de control basado en inteligencia artificial (IA), como las redes neuronales artificiales evolutivas, difiere de los sistemas de control convencionales porque solo requiere de entrenamiento y conocimiento del comportamiento de las variables del proceso a controlar. En el caso de un reactor de fermentación, los factores principales que se deben tener en cuenta son la temperatura, la cinética de crecimiento de los microorganismos y la concentración del producto final de la fermentación. Este planteamiento

desafía los paradigmas de ajuste tradicionales de los sistemas de control convencionales. Es crucial garantizar que el sobreaprendizaje no se produzca repetidamente. Esto puede lograrse aplicando un algoritmo de entrenamiento autoajustable que se adapte a la dinámica del propio proceso fermentativo.

Las siguientes ecuaciones describen las leyes de control para el controlador PID convencional y el controlador GMC menos convencional [18]. Los métodos clásicos o heurísticos para determinar los parámetros de control PID fueron introducidos por Ziegler y Nichols en 1942. Estos métodos han tenido un impacto significativo en la práctica y continúan siendo una referencia en la actualidad, a pesar de no brindar un ajuste óptimo. Estos métodos se basan en la caracterización de la dinámica del proceso utilizando dos parámetros para determinar los parámetros del controlador PID.

El método de respuesta en frecuencia se implementó para caracterizar la dinámica del sistema en lazo cerrado utilizando únicamente la acción de control proporcional. El proceso involucra incrementar la ganancia proporcional, Kp, comenzando desde cero hasta que el sistema exhiba oscilaciones sostenidas en la salida. Este enfoque lleva al sistema al límite de la estabilidad. Los parámetros que caracterizan la dinámica del sistema son Ku, la ganancia proporcional a la que se producen oscilaciones sostenidas, y Tu, el periodo de oscilación correspondiente. Una vez determinados estos parámetros, se pueden obtener los parámetros del controlador PID utilizando la Tabla 1 [19].

Tabla 1. IISE y estados de evolución

Arquitectura neuronal (1,1,1)	Función de excitación (FT, FL, FBR)	ISE 10^{-2}	Estados de evolución
Cuatro salidas	Pendiente tangencial 1.5	0.3191	1.0737×10^9
Cuatro salidas	Pendiente logarítmica 1.5	0.2966	1.0737×10^9
Tres salidas	Pendiente de base radial gaussiana 0.5	0.1887	27

Control PID: Ecuación (26).

$$\frac{dx}{dt} = K\left((x_{sp} - x) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (x_{sp} - x) dt + T_d \frac{d(x_{sp} - x)}{dt}\right)$$
(26)

Control GMC: Ecuación (27).

$$\frac{dx}{dt} = k_1 (x_{sp} - x) + k_2 \int_0^t (x_{sp} - x) dt \qquad (27)$$

3. Resultados y discusión

El objetivo del entrenamiento de una red neuronal es determinar los parámetros de linealización del modelo matemático. En el caso del reactor de polimerización, la Figura 4 ilustra el proceso de linealización del modelo matemático a través del entrenamiento de la red neuronal evolutiva. Durante la fase inicial de entrenamiento, se generan secuencialmente los parámetros que guían la evolución de la red.

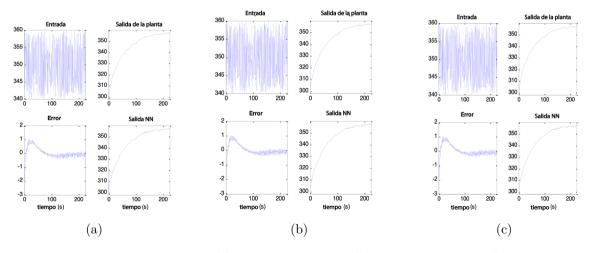


Figura 4. Respuestas de planta y RNAE (a) Función logarítmica, (b) Base radial gaussiana, (c) Función tangencial

Los gráficos de entrenamiento, validación y prueba de la Figura 5 ilustran las principales tendencias de la red neuronal evolutiva. Específicamente, la Figura 5a muestra el proceso de entrenamiento para la función tangencial, que presenta un patrón de convergencia similar al de la función logarítmica (Figura 5d) con

un valor de 0,79274. Por otro lado, el entrenamiento de la función radial gaussiana converge a un valor de 0,99957, lo que indica que esta función tiene una menor tendencia al sobreaprendizaje (Figura 5g).

Los gráficos de validación y prueba muestran un comportamiento similar para las tres funciones.

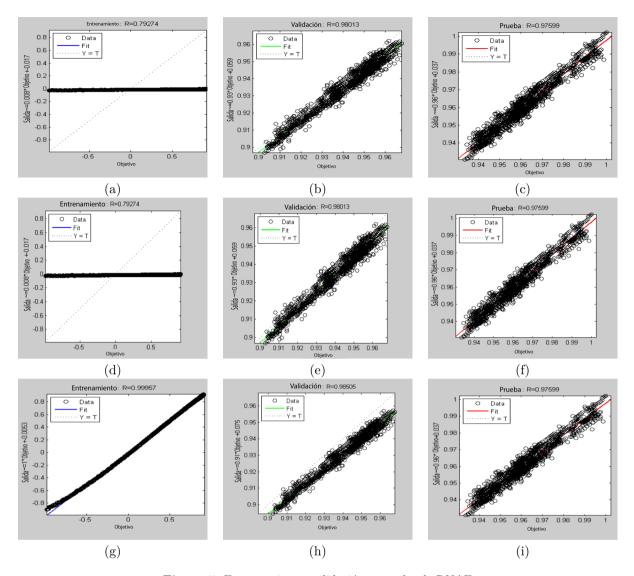


Figura 5. Entrenamiento, validación y prueba de RNAE

Los resultados obtenidos de la red neuronal evolutiva se presentan en la Tabla 1, la cual muestra la arquitectura de la red neuronal artificial y el estado evolutivo para diferentes funciones de excitación. Es válido mencionar que las simulaciones se realizaron en Matlab, cambiando el número de salidas de la red neuronal en un rango de 2 a 4 salidas para cada neurona, mismas que se obtuvieron a partir de los estados evolutivos. Los estados de evolución proporcionan el número total de neuronas evolucionadas para el sistema de control.

Una de las principales ventajas de implementar un sistema de control utilizando redes neuronales artificiales evolutivas es la capacidad de obtener estructuras neuronales simples que evolucionan según la dinámica propia del proceso. Esto significa que con un diseño básico (fenotipo neuronal), el sistema puede adaptarse a la dinámica y a las no linealidades sin necesidad de un entrenamiento constante, proporcionando un

sistema de autoaprendizaje en bucle cerrado o abierto, que se adapta a los requisitos específicos del proceso a controlar. En cambio, los sistemas de control convencionales, como el PID, necesitan ser ajustados en un bucle cerrado, lo que puede tomar mucho tiempo para finalmente no adaptarse completamente a la dinámica del proceso.

Se analizaron las tres funciones de excitación con diferentes pendientes, valorando su influencia en la evolución de los estados. Además, se calculó el error cuadrático integral (ISE) para determinar qué red neuronal se ajusta mejor a la dinámica del proceso.

La Tabla 2 muestra el análisis del error cuadrático integral (ISE) de los dos controladores utilizados en la comparación (PID y GMC). Este análisis proporciona información crucial para establecer el ajuste óptimo de los controladores a la dinámica del proceso.

Tabla 2. ISE de los controladores PID y GMC

Tipo de Control	ISE
PID	0.3662
GMC	0.0198

La estructura de la red neuronal seleccionada presenta errores mínimos. La red neuronal evolutiva con una función de base radial gaussiana con un valor de $\alpha=0.5$ arroja el menor número de estados de evolución, con un total de 27. Estos pocos estados de evolución indican que las redes neuronales añadidas no presentan sobreaprendizaje. Los errores se reparten eficazmente entre los pesos y se incorporan al proceso de entrenamiento. Además, la red neuronal está configurada con tres salidas, lo cual es una elección adecuada, ya que evita la formación de nuevas neuronas que podrían dar lugar al sobreaprendizaje.

La Figura 6 muestra la respuesta del sistema de control neuronal utilizando la función de base radial gaussiana con tres salidas de red neuronal. Se puede observar que el sistema sigue adecuadamente el punto de ajuste en un corto período de tiempo sin generar una respuesta brusca, lo que indica un control efectivo por parte del controlador.

Las Figuras 7 y 8 muestran la respuesta del controlador para las otras dos funciones de excitación con diferentes pendientes y número de salidas, como se indica en la Tabla 1. La respuesta de la función de control tangencial con cuatro salidas exhibe un pico transitorio en la temperatura de la chaqueta, como se muestra en la Figura 7. Sin embargo, cuando se utiliza la función logarítmica con una pendiente de 1,5 y el mismo número de salidas, la respuesta de control está bien ajustada al punto de ajuste. Esta respuesta muestra un comportamiento similar a la respuesta obtenida con la función de base radial con una pendiente de 0,5. Es importante tener en cuenta que la función logarítmica presenta un mayor número de estados de evolución, lo que puede provocar un sobreaprendizaje en la red neuronal evolutiva.

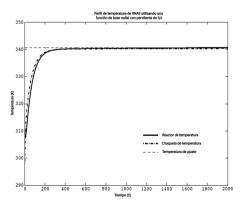


Figura 6. Perfil de temperatura de RNAE Control, utilizando una función de base radial

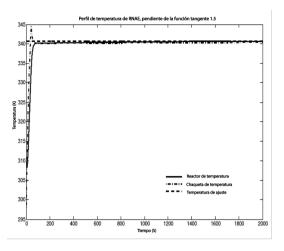


Figura 7. Perfil de temperatura de RNAE Control, utilizando una función tangencial

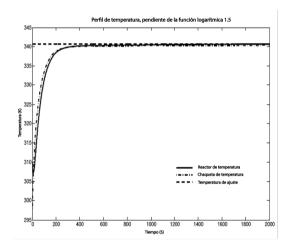


Figura 8. Perfil de temperatura de RNAE Control, utilizando una función logarítmica.

La respuesta del control PID se muestra en la Figura 9. Es válido mencionar que el control PID fue ajustado utilizando la técnica de Zeigler-Nichols [19] para cada una de las constantes del controlador. La respuesta del control PID muestra un sobreimpulso más significativo que el control con redes neuronales. Esto puede atribuirse principalmente a la técnica de ajuste, la cual tiende a aumentar el sobreimpulso. El control GMC también requiere de ajuste porque depende de una constante del controlador. La técnica de ajuste utilizada para el control GMC es la propuesta por Lee-Sullivan [18] y la respuesta del control GMC se muestra en la Figura 10. Comparado con el control PID, el control GMC no muestra un sobreimpulso significativo en su respuesta de control, lo cual confirma que la técnica de ajuste del controlador es sensible a la respuesta del sistema.

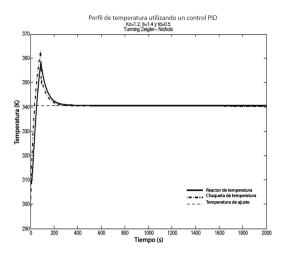
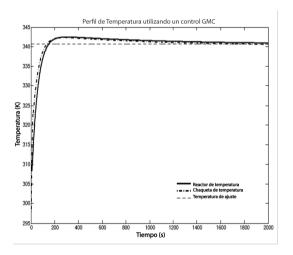


Figura 9. Perfil de temperatura, utilizando un control PID



 ${\bf Figura~10.}~$ Perfil de temperatura, utilizando un control GMC

Además de minimizar el error cuadrático integral (ISE) en el control, es necesario considerar las perturbaciones que puedan surgir en el sistema para evaluar la capacidad de respuesta del sistema de control. En este estudio los tres sistemas de control: PID, GMC y RNAE se sometieron a dos perturbaciones: ajuste con el menor tiempo muerto (Td) y con una frecuencia mínima. La respuesta del controlador PID a la perturbación se caracteriza por un fallo en el retorno al punto de ajuste, provocando la inestabilidad del control, tal y como se muestra en la Figura 11. El control GMC presenta variaciones en la travectoria de los cambios del punto de ajuste, tal y como se muestra en la Figura 12 El control RNAE sigue el punto de ajuste secuencialmente sin ninguna variación, como se muestra en la Figura 13. Las perturbaciones demuestran la robustez del sistema de control, demostrando que las redes neuronales evolutivas con función radial gaussiana ofrecen mejores resultados que los métodos de control PID y GMC.

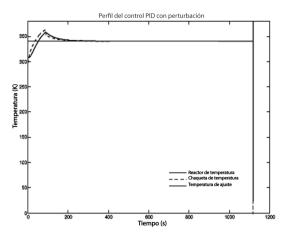


Figura 11. Control PID con perturbación

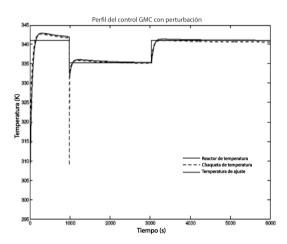


Figura 12. Control GMC con perturbación

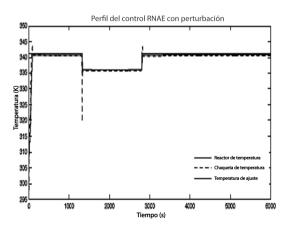


Figura 13. Control RNAE con perturbación

4. Conclusiones

Este estudio presenta un enfoque de control innovador basado en redes neuronales artificiales evolutivas. El sistema de control incorpora diferentes funciones de excitación y permite modificar el número de salidas de la red neuronal. El análisis de estas dos variables pone de manifiesto la tendencia evolutiva de la red neuronal. El reactor de polimerización utilizado en el caso de estudio para producir polimetilmetacrilato (PMMA) es un sistema dinámico que implica retos y desafíos para los métodos de control convencionales como el PID y otros enfoques menos tradicionales como el GMC. Aunque estos métodos pueden ofrecer resultados satisfactorios, se ven limitados por la necesidad de ajustes constantes del controlador. Sin embargo, el control basado en redes neuronales evolutivas supera esta limitación al adaptarse a la naturaleza dinámica del proceso sin requerir ajustes constantes. Además, el control basado en redes neuronales evolutivas logra reducir eficazmente el sobreimpulso en comparación con métodos de control convencionales como PID y GMC.

Con respecto a los diferentes tipos de funciones de excitación, resulta evidente que la función más compleja, la de base radial, genera una mejor respuesta del controlador basado en redes neuronales evolutivas. Al comparar el control basado en la función logarítmica con el de la función de base radial, se aprecia una diferencia notable en los estados de evolución minimizados. La función de base radial requiere menos salidas de la red neuronal, lo que se traduce en un menor número de estados de evolución. Esta es una característica significativa, ya que reduce la probabilidad de que la red experimente sobreaprendizaje. Por lo tanto, la función de base radial ofrece una ventaja al minimizar el riesgo de sobreaprendizaje, garantizando así una respuesta de control más efectiva.

Una opción viable para entrenar redes neuronales artificiales evolutivas es el aprendizaje profundo, el cual puede ser implementado utilizando un esquema de entrenamiento supervisado de redes neuronales. Este enfoque puede ser una alternativa para este tipo de sistemas, principalmente cuando se dispone de pesos suficientes para proyectar la dinámica del proceso. En este contexto, es posible utilizar estructuras o arquitecturas neuronales simples en un proceso de entrenamiento supervisado. Además, la exploración de algoritmos de evolución de redes neuronales abre un camino prometedor para el control de procesos no lineales, proporcionando un nuevo y emocionante campo de estudio.

Referencias

[1] J. Narkiewicz, M. Sochacki, and B. Zakrzewski, "Generic model of a satellite attitude control

- system," International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2020, p. 5352019, Jul 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2020/5352019
- [2] N. F. Salahuddin, A. Shamiri, M. A. Hussain, and N. Mostoufi, "Hybrid fuzzy-GMC control of gas-phase propylene copolymerization in fluidized bed reactors," *Chemical Engineering Journal Ad*vances, vol. 8, p. 100161, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100161
- [3] M. S. Mahmoud, M. Maaruf, and S. El-Ferik, "Neuro-adaptive fast terminal sliding mode control of the continuous polymerization reactor in the presence of unknown disturbances," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 3, pp. 1167–1176, Sep 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s40435-020-00731-x
- [4] E. S. Yadav, P. Shettigar J, S. Poojary, S. Chokkadi, G. Jeppu, and T. Indiran, "Datadriven modeling of a pilot plant batch reactor and validation of a nonlinear model predictive controller for dynamic temperature profile tracking," ACS Omega, vol. 6, no. 26, pp. 16714– 16721, 2021, pMID: 34250331. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00087
- [5] M. Maaruf, M. M. Ali, and F. M. Al-Sunni, "Artificial intelligence-based control of continuous polymerization reactor with input dead-zone," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 11, no. 3, pp. 1153–1165, Jun 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s40435-022-01038-9
- [6] P. Shettigar J, K. Lochan, G. Jeppu, S. Palanki, and T. Indiran, "Development and validation of advanced nonlinear predictive control algorithms for trajectory tracking in batch polymerization," ACS Omega, vol. 6, no. 35, pp. 22857–22865, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03386
- [7] H. Wang and Y. Chen, "Application of artificial neural networks in chemical process control," *Asian Journal of Research in Computer Science*, vol. 14, no. 1, pp. 22–37, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.9734/ajrcos/2022/v14i130325
- [8] M. L. Dietrich, A. Brandolin, C. Sarmoria, and M. Asteasuain, "Mathematical modelling of rheological properties of low-density polyethylene produced in high-pressure tubular reactors," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 3, pp. 378–382, 2021, 16th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.271

- [9] P. Shettigar J, J. Kumbhare, E. S. Yadav, and T. Indiran, "Wiener-neural-network-based modeling and validation of generalized predictive control on a laboratory-scale batch reactor," ACS Omega, vol. 7, no. 19, pp. 16341–16351, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07149
- [10] D. Q. Gbadago, J. Moon, M. Kim, and S. Hwang, "A unified framework for the mathematical modelling, predictive analysis, and optimization of reaction systems using computational fluid dynamics, deep neural network and genetic algorithm: A case of butadiene synthesis," *Chemical Engineering Journal*, vol. 409, p. 128163, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128163
- [11] M. García-Carrillo, A. B. Espinoza-Martínez, L. F. Ramos-de Valle, and S. Sánchez-Valdés, "Simultaneous optimization of thermal and electrical conductivity of high density polyethylene-carbon particle composites by artificial neural networks and multi-objective genetic algorithm," Computational Materials Science, vol. 201, p. 110956, 2022. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110956
- [12] L. Ghiba, E. N. Drăgoi, and S. Curteanu, "Neural network-based hybrid models developed for free radical polymerization of styrene," Polymer Engineering & Science, vol. 61, no. 3, pp. 716–730, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/pen.25611
- [13] K. Bi, S. Zhang, C. Zhang, H. Li, X. Huang, H. Liu, and T. Qiu, "Knowledge expression, numerical modeling and optimization application of ethylene thermal cracking: From the perspective of intelligent manufacturing," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 38, pp. 1–17, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.03.033
- [14] K. Ahmad, H. R. Ghatak, and S. M. Ahuja, "Response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) approach to optimize the photocatalytic conversion of rice straw hydrolysis residue (RSHR) into vanillin and 4-hydroxybenzaldehyde," Chemical Product and Process Modeling, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1515/cppm-2022-0003
- [15] E. M. de Medeiros, H. Noorman, R. Maciel Filho, and J. A. Posada, "Production of ethanol fuel via syngas fermentation: Optimization of economic performance and energy efficiency," *Chemical Engineering Science: X*,

- vol. 5, p. 100056, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cesx.2020.100056
- [16] S. Greydanus, M. Dzamba, and J. Yosinski, "Hamiltonian neural networks," in Advances in Neural Information Processing Systems, H. Wallach, H. Larochelle, A. Beygelzimer, F. d'Alché-Buc, E. Fox, and R. Garnett, Eds., vol. 32. Curran Associates, Inc., 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/3qhXPxB
- [17] J. Zeng, L. Cao, M. Xu, T. Zhu, and J. Z. H. Zhang, "Complex reaction processes in combustion unraveled by neural network-based molecular dynamics simulation," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p. 5713, Nov 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/s41467-020-19497-z
- [18] H. Wang and R. Mo, "Review of neural network algorithm and its application in reactive distillation," Asian Journal of Chemical Sciences, vol. 9, no. 3, pp. 20–29, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.9734/ajocs/2021/v9i319073
- [19] I. Moreno and J. Serracín, "Dr. Santiago Ramón y Caja," *Prisma Tecnológico*, vol. 12, no. 1, pp. 86–87, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.33412/pri.v12.1.2985
- [20] V. Buhrmester, D. Münch, and M. Arens, "Analysis of explainers of black box deep neural networks for computer vision: A survey," *Machine Learning and Knowledge Extraction*, vol. 3, no. 4, pp. 966–989, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/make3040048
- [21] H. Chen, C. Fu, J. Zhao, and F. Koushanfar, "Deepinspect: A black-box trojan detection and mitigation framework for deep neural networks," in Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-19. International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization, 7 2019, pp. 4658–4664. [Online]. Available: https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/647
- [22] E. Zihni, V. I. Madai, M. Livne, I. Galinovic, A. A. Khalil, J. B. Fiebach, and D. Frey, "Opening the black box of artificial intelligence for clinical decision support: A study predicting stroke outcome," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 4, pp. 1–15, 04 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231166
- [23] R. Miikkulainen, J. Liang, E. Meyerson, A. Rawal, D. Fink, O. Francon, B. Raju, H. Shahrzad, A. Navruzyan, N. Duffy, and B. Hodjat, "Chapter 15 - evolving deep neural networks," in Artificial Intelligence in the Age of Neural Networks and Brain Computing, R. Kozma, C. Alippi, Y. Choe,

- and F. C. Morabito, Eds. Academic Press, 2019, pp. 293–312. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815480-9.00015-3
- [24] Bilal, M. Pant, H. Zaheer, L. García-Hernández, and A. Abraham, "Differential evolution: A review of more than two decades of research," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 90, p. 103479, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103479
- [25] A. Bashar, "Survey on evolving deep learning neural network architectures," *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 2, pp. 73–82, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.36548/jaicn.2019.2.003
- [26] Y. Sun, B. Xue, M. Zhang, and G. G. Yen, "Evolving deep convolutional neural networks for image classification," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 24, no. 2, pp. 394–407, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2916183
- [27] E. Ekpo and I. Mujtaba, "Evaluation of neural networks-based controllers in batch polymerisation of methyl methacrylate," *Neurocomputing*, vol. 71, no. 7, pp. 1401–1412, 2008, progress in Modeling, Theory, and Application of Computational Intelligenc. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.05.013





Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel

Advances and strategies to improve the performance of biodiesel in diesel engine

Héctor-Hugo Riojas-González^{1,*}, Liborio-Jesús Bortoni-Anzures¹, Juan-Julián Martínez-Torres¹, Héctor A. Ruiz²

Recibido: 19-04-2023, Recibido tras revisión: 11-05-2023, Aceptado: 29-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

La demanda de diésel en vehículos pesados se incrementa cada año en el mundo. El posible uso de combustibles alternativos como el biodiésel tiene algunas desventajas como el menor valor calorífico y su mayor viscosidad, por esta razón se requiere mejorar sus propiedades, optimizando el comportamiento de la combustión en el motor y en la reducción de las emisiones. El objetivo del trabajo de investigación es explorar las diferentes mezclas que puedan ayudar a mejorar el uso del biodiésel a través de las estrategias y avances que se han generado con el propósito de beneficiar el desempeño del motor diésel. Entre las distintas estrategias de mejoramiento del biodiésel están las mezclas de distintos bioaceites (aceites vegetales, de pirólisis y usado de cocina), mezclas del biodiésel con alcohol, con hidrógeno, el biodiésel como combustible piloto, las emulsiones del biodiésel con agua y la aplicación del biodiésel con antioxidantes, nanotubos y nanopartículas. Se concluye que para poder usar actualmente el biodiésel se lo haría con la combustión dual, en donde este representaría el combustible piloto (10 % o 20 % del combustible total del motor). Con esta estrategia se puede impulsar a otros combustibles (líquidos y gaseosos) en la combustión dual, para que con el paso del tiempo se encuentre la mezcla óptima que sea la mejor opción para el motor diésel.

Palabras clave: biodiésel, motores, mezclas, aceites, combustión dual, emulsiones

Abstract

The demand for diesel utilization in heavy-duty vehicles continues to increase worldwide. However, the potential use of alternative fuels such as biodiesel has disadvantages, such as lower calorific value and higher viscosity. For this reason, it is necessary to improve its properties to optimize combustion in the engine and reduce emissions. This research explores the various blends that can improve biodiesel utilisation through strategies and advancements that optimize diesel engine performance. Among the various strategies to improve biodiesel, we find the mixtures of different bio-oils (vegetable oils, pyrolysis oils, and used cooking oils), blends of biodiesel with alcohol and hydrogen, the use of biodiesel as a pilot fuel, emulsions of biodiesel with water, and the application of antioxidants, nanotubes, and nanoparticles to biodiesel. It is concluded that currently, biodiesel can be used through the dual combustion technique, where it acts as a pilot fuel representing 10% or 20% of the total fuel in the engine. This strategy allows for the promotion of other fuels (liquids and gases) in dual combustion to find the optimal blend that is the best option for the diesel engine.

Keywords: Biodiesel, engines, mixtures, oils, dual combustion, emulsions

Forma sugerida de citación: Riojas-González, H. H.; Bortoni-Anzures, L. J.; Martínez-Torres, J. J. y Ruiz, H. A. "Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 90-105, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.08.

¹,*Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Autor para correspondencia ≅: hriojasg@upv.edu.mx

²Grupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

1. Introducción

La demanda del combustible más usado para vehículos pesados es el diésel, su demanda aumentará en un 85 %, mientras que la de la gasolina caerá aproximadamente un 10 % durante el periodo 2010-2040 [1]. Por lo que la creciente demanda de energía de transporte está dirigida a los motores diésel [2]. Desafortunadamente, el sector de transporte mundial es uno de los principales responsables de la contaminación del medioambiente, genera el 26 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Los biocombustibles son considerados combustibles neutros de carbono, el CO₂ producido por los biocombustibles es fácilmente secuestrado por cultivos de plantas mediante la fotosíntesis. Entre los biocombustibles se encuentra el biodiésel, el cual tiene un menor contenido energético comparándolo con el diésel, esto es debido a que el primero tiene mayor densidad, viscosidad, consumo de combustible específico del freno y mayores emisiones de NO_x. Todo esto no ayuda al biodiésel para superar estas limitaciones.

La aplicación de los aditivos a base de metales, aditivos oxigenados, antioxidantes, desarrolladores de cetano, lubricantes y optimizadores de propiedad de flujo en frío, ayudan a mejorar las propiedades del

biodiésel, además de la adición de alcohol [4] y la mezcla de diésel-alcohol con biodiésel generan como resultado el diesterol. En la búsqueda de mejorar las propiedades del biodiésel, muchos investigadores han adoptado diversos métodos como la transesterificación (Figura 1), calentamiento de aceite, emisión con alcohol y mezclas con diésel o con otros combustibles alternativos [5], incluso hasta se ha llegado a la obtención de un diésel renovable que, a diferencia del biodiésel, se puede obtener a partir de lípidos (aceite o grasa) como materia prima por reacción de hidrooxigenación a temperatura y presión elevadas con la presencia de un catalizador [6]. El objetivo de esta investigación es explorar las diferentes mezclas que puedan ayudar a meiorar el uso del biodiésel a través de algunas estrategias y avances que se han generado con el propósito de beneficiar el desempeño del motor diésel. El punto más crítico para la obtención del biodiésel es la materia prima.

2. Mezclas con distintos aceites

Existen varios autores que recomiendan mezclas de distintos aceites (Tabla 1).

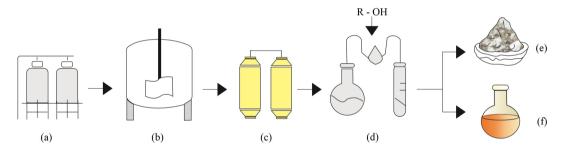


Figura 1. Proceso de transesterificación; (a) catalizador, (b) rector con aceite, (c) acondicionamiento, (d) purificación, (e) sales y (f) biodiésel

Tabla 1. Rendimiento del motor diésel con distintos bioaceites comparándolos con el diésel convencional

Tipo de bioaceite	Tipo de rendimiento	Comentarios	Ref.
Soja éster metílico (SME) y éster metílico de la grasa amarilla (YGME)	Se aumentó el BSFC de YGME (12.2 %) y GME (12.9 %).	Ambos tienen menor valor calorífico, pero buena oxigenación que genera mejor combustión.	[7]
Aceite de semilla de Pithecellobium	Aumentó el BSFC.	Se generó menor presión en el cilindro, velocidad de liberación de calor y temperatura de escape.	[8]
Aceites de cáscara de naranja	Mejoró el BTE en plena carga.	Las reducciones causadas por la baja viscosidad de aceite mejoran el proceso de combustión completa.	[9]
Aceite de PODE	Mejoró el BTE por el tipo de aceite.	Por la alta proporción de mezcla del aceite con el diésel.	[10]

Tipo de bioaceite	Tipo de rendimiento	Comentarios	Ref.
Aceite de palma	Se redujo la potencia de salida y aumento el BSFC.	El aceite con EGR provocó que la tasa de liberación disminuya y genere menos reacciones químicas entre el	[11]
JOME	Aumentó el BTE y disminuyó el BSFC.	combustible y el oxígeno. Con el aumento de EGR mejoró el rendimiento del motor en general. La disminución de la eficiencia en el	[12]
Aceite de Mahua	El BSFC aumentó y el BTE disminuyó.	motor se incrementaba si se aumentaba la mezcla de biodiésel.	[13]

Está el caso de Vallinayagam et al. [14], quienes determinaron que una mezcla del 50 % de Kapok Metil Ester (KME) y un 50 % de aceite de pino son óptimos en términos de rendimiento y emisiones en donde se registró una reducción de HC, humo y CO, sin embargo, el BTE de la mezcla fue inferior al diésel con poca carga, pero esta fue muy similar al diésel en carga alta. De acuerdo con Singh et al. [15], una mezcla de 70 % de aceite de Aamla y 30 % de aceite de eucalipto generan una mezcla óptima, ya que reducen emisiones de CO, HC y humo, mientras que el NO $_{\rm x}$ es equivalente al diésel.

Otra mezcla de aceites lo registran Kasiraman et al. [16], recomiendan una mezcla del aceite de cáscara

de anacardo al 70 % mezclado con un 30 % de aceite de alcanfor, muestran resultados alentadores, pero sigue siendo inferior al diésel. Otra mezcla de aceites lo presentan Dubey y Gupta [17], en donde recomiendan una mezcla del 50 % de Jatropha y 50 % de aceite de trementina. Esta mezcla generó los mejores resultados comparada con otras muestras en donde hubo una reducción de NO_x , CO, HC y humo frente al diésel en condiciones a plena carga. Finalmente, Sharma y Murugan [18] encontraron que la mezcla óptima se puede dar con un 20 % de aceite de pirólisis de llanta y con un 80 % de aceite de Jatropha. En la Tabla 2 se muestran las propiedades fisicoquímicas del biodiésel.

Ref.

[26]

38,84

Tipo de Densidad Punto de Viscosidad Número de Valor biodiésel (kg/m^3) a 40 °C, cSt inflamación (°C) calorífico cetano (MJ/k)1.3 52 42,8 Aceite de pino 875,1 11 Aceite de pirólisis 3,35 58 28 38.1 Aceite de naranja 816 3,52 74 47 34.6

Tabla 2. Propiedades técnicas de diversos tipos de biodiésel

[14] [18]Aceite de mahua 960 232 36,1 [13]24,58 47,1 38,4 [19] Aceite de soja 885 4,11 Aceite de cocina usado 871 5,28 51 37,5 20 21 Aceite de colza 886 6.18 59.3 40,8 Aceite de pongamia 870 6,79 > 48 38,8 [22]Aceite de ceiba pentandra 880 1.9-6.0 47 23 Aceite de Jatropha 874,3 4,34 130 52,7 42,67 24 Aceite de girasol 880 4,3 148 54 40.76 [25]56,3 [26] Aceite de salvado de arroz 880 39,54

3. Mezcla de biodiésel con alcohol

Aceite de palma

La alta viscosidad, baja volatilidad y pobres propiedades de flujo en frío del biodiésel afectan la calidad de combustión [19]. Sin embargo, las propiedades pueden mejorarse mezclándolo con alcoholes [27]. Las mezclas del combustible del diesterol (compuesto de diésel, biodiésel y etanol) han demostrado mayor eficiencia, rendimiento y menores emisiones, esto se debe

870

a que el etanol tiene un alto valor calorífico y baja densidad en comparación con el biodiésel por lo que lo compensa [28].

56.5

De la misma manera, el etanol tiene baja viscosidad y buenas propiedades de flujo en frío, por lo que la mezcla con biodiésel ayuda a que este último disminuya su viscosidad, aumentando su volatilidad y logrando mejorar sus propiedades de flujo en frío [29]. En la Tabla 3 se presenta la mezcla del etanol con

biodiésel y sus emisiones. Además, el mayor contenido de oxígeno del etanol puede reducir más la emisión de PM en su mezcla con el biodiésel [20]. El alto número de cetano de biodiésel compensa con el bajo número de cetano del etanol, por lo que, en consecuencia, mejora la combustión del motor [21].

La presencia del biodiésel en la mezcla de etanol y diésel aumenta el índice de cetano y mejora la calidad

de autoignición de la mezcla [30]. Por otra parte, agregar etanol a la mezcla de biodiésel-diésel mejora las propiedades físicas generales como las características de evaporación y el tamaño de gota de la mezcla de combustible [22]. En las Tablas 4 y 5 se muestran las mezclas de biodiésel con alcoholes en el desempeño del motor.

Tabla 3. La generación de emisiones con la mezcla de biodiésel con etanol

Emisión que reduce	Comentarios	Ref.
NO_x	Se puede reducir las emisiones con la mezcla biodiésel-etanol.	[31]
CO, NO_x y humo	La reducción se debió a la mezcla en comparación con el biodiésel puro.	[32]
PM y NO _x	La mezcla tiene mayor tasa máxima de liberación de calor y máxima presión en el cilindro en comparación al biodiésel puro.	[20]
HC, CO y hollín	El diesterol reduce el BSFC, la presencia del etanol es un oxidante para el hollín.	[33]
NO_x	Con el diesterol genera un alto calor de vaporización, pero al mismo tiempo reduce el NO_x .	[34]

Tabla 4. La generación de emisiones en la mezcla de biodiésel con alcoholes

Emisión que reduce	Tipo de alcohol	La causa de esto	Ref.
		Se aumentó el BTE con una	
$_{\mathrm{PM}}$	Butanol	adición del 20 % de	[35]
		butanol con el biodiésel.	
CO y HC	Butanol	El pentanol tuvo mejor	
	y pentanol	rendimiento del motor	[23]
		mezclado con biodiésel.	
		La mayor presión de inyección	
NO_x y hollín	n-Butanol	de butanol mezclado con	[36]
		biodiésel es una técnica viable.	
		La tasa de presión máxima de	
NO_x	DME	liberación de calor disminuye con la	[37]
		mezcla de biodiésel con DME.	
		El pentanol mezclado con biodiésel	
$_{\mathrm{PM}}$	n-Petanol	reduce las emisiones de partículas	[38]
		de manera dramática.	
NO _x , HC y CO	1-Petanol	La mezcla reduce las emisiones	[39]
1.0 _x , 110 y 00	1 1 coanor	con una pequeña perdida de BTE.	[30]
СО у НС	1-Octanol	La adicción de n-octanol mejora	[40]
	1-Octanoi	el BTE, pero aumenta el NO_x .	[40]

Composición de la mezcla	Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
Diésel al 70 %, aceite de Jatropha al 20 %, etanol al 10 % y adición de 25 ppm de nanopartículas de Al ₂ O ₃	HC, CO, NO _x y humo	La presión máxima del cilindro y el calor máximo de la tasa de liberación se alcanzó más cerca de TDC.	[24]
Diésel al 40 %, 40 % de biodiésel, 10 % de aceite vegetal y 10 % de propanol	$\mathrm{NO_x}$	La mezcla tuvo la mayor BSFC y menor NO _x , pero causó un aumento en CO y HC.	[41]
Mezcla de diésel, biodiésel de girasol residual, n-pentanol y n-hexanol	Varios	Además, se adicionó el n-heptanol y mejoró los valores de BTE y BSFC.	[42]
Mezcla del 5 % de DEE el resto de biodiésel de aceite de soja y diésel	СО	Mejoró la BSFC, sin embargo, si se le agregan más del 40 % de DEE, el motor podría sufrir una detonación.	[43]
20 % de etanol y 80 % de biodiésel de aceite de girasol	${\rm CO~y~NO_x}$	Con la mezcla se tuvo una mayor eficiencia térmica y si se usa con baja velocidad se incrementa el NO _x .	[25]

Tabla 5. La generación de emisiones en la mezcla de biodiésel con alcoholes

Otra mezcla del biodiésel puede ser con alcoholes superiores de cadena larga, como el caso del butanol y el pentanol; se puede mezclar con biodiésel (hasta un 20 %) y diésel en motor diésel sin alteraciones [44]. Como lo mencionan Babu et al. [44], en donde concluyeron que hasta un 29 % se puede agregar butanol mezclado con biodiésel sin que se genere ningún tipo de modificación al motor, logrando con esto, mejorar las propiedades del biodiésel y con esto beneficiar una mejor combustión de las mezclas.

4. Mezcla de biogás con biodiésel

En la combustión dual se puede usar biogás como combustible principal y biodiésel como combustible piloto. Sahoo [45] estudió el rendimiento del biogás en combustión dual, generando un BTE de 16.8 % y 16.1 % para diésel y biodiésel de Jatropha, respectivamente, en comparación con el 20.9 % del modo diésel convencional. Luijten y Kerkhof [46] analizaron un biogás sintético (variación de $\rm CO_2$ del 30 al 60 %), con un motor diésel de un solo cilindro de aspiración natural alimentado de biodiésel de Jatropha como combustible piloto; reportaron una pequeña variación en BTE del motor con un aumento de energía de biogás con altas cargas, mientras que con bajas cargas el

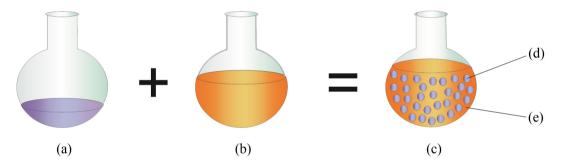
biogás resultó con una disminución significativa del BTE. En la Tabla 6 se muestra el comportamiento del motor con la mezcla de biodiésel, alcohol y biogás.

5. Aplicación de bioaceite con agua

El combustible emulsionado de agua en biodiésel (Figura 2) podría ser la principal contribución en la reducción de NO_x y PM [47], de igual manera se reduce el humo, pero el consumo de combustible, el CO y HC se incrementan [48]. El combustible en emulsión da menor desgaste y fricción, esta reducción puede ser correlacionada con la presencia de agua, la cual provoca una baja temperatura y con esto disminuye el desgaste de la combustión [49]. La emulsión de agua aumenta el BTE, ya que la eficiencia de la combustión mejora la atomización y evaporación del combustible, formando una microexplosión, la cual genera una formación de aerosol, fino logrando una mayor vaporización del combustible. El frenado continuo de las gotas de agua en el proceso de emulsión aumenta la superficie de evaporación y garantiza la mezcla precisa, como resultado se mejora la reacción y la eficiencia de combustión [50] En la Tabla 7 se presentan resultados en la aplicación de emulsiones con biodiésel.

Tabla 6.	Mezcla d	le combustible	dual con	bioaceite	v alcohol	con biogás
rabia o.	TITOZOTA G	.c combabatore	addi con	DIOGCCICC	, arconor	COII DIOSG

Tipo de mezcla	Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
Biodiésel de soja como combustible piloto y biogás	Hollín	La combustión de biogás con biodiésel muestra un buen desempeño y reducción de hollín.	[51]
Éster metílico de aceite de salvado de arroz con biogás	СО у НС	El biodiésel de aceite de salvado de arroz tuvo un mejor desempeño con el biogás con relación de compresión más alta.	[26]
Biodiésel como combustible piloto con un 6 % de DEE como suplemento, el combustible principal fue el biogás	CO, HC y humo	Con la mezcla se tuvo una mejora en el rendimiento del motor y una reducción de BSFC, pero con un incremento de NO _x .	[43]



 $\textbf{Figura 2.} \ \ \textbf{Fen\'omeno} \ \ \textbf{de la emulsificaci\'on: (a) 30 \% agua, (b) 70 \% \ \ \textbf{combustible, (c) emulsi\'on, (d) fase dispersa, (e) fase continua }$

Tabla 7. Aplicación de bioaceites en emulsiones

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Características del rendimiento del motor	Ref.
CO y humo	CO_2	Con la emulsión el BSFC y BSEC aumentaron y el BTE se mantuvo sin cambios.	[52]
NO_{x} y humo	CO, CO_2 y HC	El uso de microemulsiones de diestrol-agua tuvo un aumento de BSFC y redujo el BTE.	[53]
$\mathrm{NO}_{\mathbf{x}}$ y hollín	CO	Se usó una nanoemulsión de biodiésel y generó un aumento del consumo de combustible.	[54]
NO_{x}	HC, CO y humo	La inyección de agua de 3 kg/h da una reducción de un 50 % de NO_x sin deterioro en el rendimiento del motor.	[55]
Humo	-	Con la emulsión de bioaceite derivado de la pirólisis de residuos de madera logró un aumento de BTE (hasta un 7.4 %).	[56]
HC y humo	-	La emulsión del aceite de pirólisis de madera y Jatropha metil éster generó un aumento de BTE (hasta un 7.3 %).	[57]

6. Mezcla de biodiésel con gas natural

El gas natural se puede usar en una combustión dual como combustible primario y el biodiésel como combustible piloto, el estudio de Paul $et\ al.$ [58] utilizó el éster metílico de pongamia pinnata (PPME) como combustible piloto en motor CI de doble combustible en donde se le agregó gas natural, el biodiésel obtuvo una mejora en el BTE y una reducción de BSFC, la combustión fue más completa y se obtuvo una reducción CO y HC, pero con un incremento de NO $_{\rm x}$.

Tarabet et al. [59] señalaron que el enriquecimiento de gas natural con H₂ en modo de combustible dual con biodiésel de eucalipto, como combustible piloto, mejora el rendimiento del motor y reduce las emisiones. El estudio de Ryu [60] realizado con aceite vegetal (fritura combustible) como combustible piloto, en un motor DI Common rail con gas natural, obtuvo como resultado una pérdida de potencia, atribuida al biodiésel por su mayor viscosidad cinemática comparada con el diésel. Otro análisis lo reportaron Senthilraja et al. [61], es-

tudiaron la combinación de mezclas de éster metílico de semilla con diésel-etanol y enriquecido con GNC e informaron un aumento de BSFC al momento de incrementar la concentración de la mezcla de biodiésel con etanol.

Finalmente, en los estudios experimentales realizados por Kalsi *et al.* [62], alimentaron un motor RCCI con biodiésel utilizando gas natural comprimido mezclado con hidrógeno, se tuvieron mejoras significativas en el BTE y en la reducción de humo, HC y CO.

7. Mezcla de biodiésel con hidrógeno

Como el hidrógeno es portador de energía libre de carbono, todas las emisiones basadas de carbono tales como HC, CO, $\rm H_2O$, PM y humo en motores diésel de combustión dual disminuyen sustancialmente en todas las cargas [63]. El rendimiento del motor, así como el comportamiento del motor y sus emisiones, con la mezcla de biodiésel con hidrógeno, se presentan en las Tablas 8 y 9 respectivamente.

Tabla 8. Rendimiento del motor con la mezcla de biodiésel con hidrógeno

Tipo de mezcla	Rendimiento del motor	Ref.
Mezcla de biodiésel con gas H_2	La mezcla reduce la vibración del motor y reduce las emisiones de escape, pero el biodiésel tiene una tendencia del ruido.	[64]
Combustible dual con hidrógeno y biodiésel	Con la mezcla se redujo la potencia del motor de 190 g/Kwh a 104 g/Kwh, cuando se hizo el cambio de diésel a biodiésel.	[65]
Mezcla de diésel con aceite de Jatropha como biodiésel y 7 $\%$ de H_2 como combustible piloto	Con un 7 % de H2 en la mezcla de diésel/biodiésel generó un aumento de BTE en condiciones de carga completa.	[66]
Mezcla de H ₂ con biodiésel de aceite éster metílico de jojoba como combustible piloto.	Se reportó una mejora importante en la eficiencia térmica y se redujo el SFC.	[67]

Emisión que reduce	Emisión que aumenta	Rendimiento del motor	Ref.
СО у НС	$\mathrm{NO_x}$	Con una mezcla de biodiésel de aceite de palma y un 20 % de gas hidroxilo reduce el consumo de combustible en comparación con el biodiésel ordinario.	[68]
CO, HC y humo	$\mathrm{NO_x}$	Con la mezcla de diésel y aceite de Jatropha como biodiésel se observó un aumento de BTE con un 10% de H_2 en la mezcla.	[66]
NO_x	-	Con una mezcla de 20 % de biodiésel y 80 % de diésel y un 10 % adicional de H ₂ con un rendimiento de motor estable. Con la mezcla de aceite de cocina	[69]
CO, HC y humo	-	desechado (WCO) emulsionado con H_2 como combustible primario, la eficiencia térmica es superior a la alta potencia.	[70]
CH ₄	-	Con una mezcla del 20 % de H_2 con biodiésel se logró reducción de emisiones.	[71]

Tabla 9. Comportamiento del motor y sus emisiones con la mezcla de biodiésel con hidrógeno

8. Mezcla de biodiésel con antioxidantes

Varios estudios han señalado que las adiciones de antioxidantes mejoran en la reducción de emisiones, entre los antioxidantes fenólicos encontramos al TBHQ, BHA y BHT que también son comúnmente usados para controlar la degradación del combustible y de esta manera mejorar el almacenamiento del biodiésel, estos antioxidantes ayudan a la reducción de NO_{x} , pero pueden generar un incremento en las emisiones de humo, CO y HC [72].

De acuerdo con el estudio de Rashedul et al. [73]. analizaron el efecto del antioxidante BHT con biodiésel de Callophyllum y encontraron que el BHT generan mejor estabilidad con una reducción de NO_x, mostrando una mayor potencia de frenado, mayor BTE y menor BSFC. Otro estudio comparativo entre antioxidantes en donde usaron biodiésel con aceite de soja lo llevó a cabo Ryu [74], concluyó que las eficiencias de los antioxidantes están en el orden de TBHQ > PrG > BHA > BHT > alfatococerol. En el estudio se halló que con el uso de estos antioxidantes disminuye el BSFC. Sin embargo, los aditivos antioxidantes comerciales suelen ser caros y se producen a partir de materiales no renovables, por lo que existe una motivación en explorar nuevos aditivos alternativos de bajo costo, obtenidos a partir de biomasa o residuos [75].

9. Nanopartículas en el biodiésel

La adición de nanopartículas al combustible mejora las propiedades termofísicas del combustible, incluyendo la conductividad, difusibilidad de masa y relación superficie-volumen, además de las propiedades fisicoquímicas como la viscosidad cinemática, punto de incendio, punto de inflamación, punto de fluidez y otras propiedades también son mejoradas [76].

En la Tabla 10 se presenta el comportamiento del motor con nanopartículas mezcladas con biodiésel. Los nanotubos de carbono aplicados (CNT) tienen el potencial de ser usados como aditivos en la combustión dual para ayudar a mejorar al combustible, y así poder obtener buenos resultados de BSFC, BTE y NO $_{\rm x}$. Sin embargo, el inconveniente de la falta de estabilidad de la mezcla (con CNT) puede resolverse con la aplicación de un estabilizador de combustible o surfactante [77]. En la Tabla 11 se presenta el comportamiento de motor con la mezcla de biodiésel y CNT.

Una buena explicación de cómo usar nanopartículas la presentan Mirzajanzadeh et al. [78], sintetizaron un número nanocatalizador híbrido soluble con el fin de mejorar el rendimiento del motor, para lo cual agregaron un compuesto de óxido de cerio y nanotubos de carbono de pared múltiple con función amida y se lo añadió a la mezcla de diésel con biodiésel. Los resultados mostraron una reducción de CO, HC, NO_x y hollín; además, el rendimiento del motor mejoró y el consumo de combustible disminuyó. Sin embargo, las nanopartículas de óxido de cerio están asociadas con riesgos de salud, como la inducción de citotoxicidad, estrés oxidativo e inflamación pulmonar [79], por lo que su uso debe ser controlado. El reemplazo de nanopartículas a base de metal por nanopartículas no metálicas puede ser importante debido a que estas primeras son muy tóxicas [80].

Tabla 10. Análisis de las nanopartículas aplicadas en el biodiésel

Emisión que reduce	Tipo de nanopartículas	Rendimiento del motor	Ref.
СО у НС	${ m TiO_2}$	Mezcla con biodiésel (20 %) y el resto de diésel con el TiO2 se redujo el BSFC y mejoro el BTE, pero aumentó el CO_2 y NO_x .	[81]
CO, CO_2 y NO_x	Nanopartículas de titanio	La mezcla de biodiésel con nanopartículas de titanio reduce el BSFC y mejora la combustión y aumenta el BTE.	[82]
СО у НС	Óxidos de nanometálicos	La mezcla de biodiésel de aceite de mahua con nanopartículas en un motor CRDI reduce emisiones.	[83]
NO_x , HC y humo	Óxidos de cerio	La mezcla de 70 % de diésel, 10 % de biodiésel de aceite de ricino y un 20 % de etanol y una adicción de 25 ppm de óxido de cerio redujo la velocidad de liberación de calor y con esto redujo emisiones.	[84]
СО у НС	Nanopartículas de alúmina	La mezcla de biodiésel con etanol y alúmina generó que aumentara la temperatura de los gases de escape y BTE, pero también incrementó el NO_x .	[85]
$CO y NO_x$	Mezclas de MgO y SiO_2	Con la adición de las nanopartículas en el biodiésel, el desempeño del motor mejoró y redujo emisiones.	[86]
HC, CO y NO _x	Óxido de cobalto $\mathrm{Co_3O_4}$	La adición de CoO ₄ en el biodiésel de aceite de Jatropha mejoró la combustión y redujo emisiones en una operación de carga de motor del 75 %.	[87]
-	Óxido de cobre	La mezcla de óxido de cobre (50 ppm) con un 20 % de biodiésel de aceite de Mahua y el resto de diésel, esta mezcla redujo la combustión incompleta y mejoró el BTE y el arranque en frío.	[88]

Tabla 11. Comportamiento del motor y las emisiones con la mezcla de biodiésel con los nanotubos de carbono aplicados (CNT)

Emisión que reduce	Rendimiento del motor	Ref.
CO, HC y NO _x	Se aplicó una mezcla de CNT con una emulsión de éster metílico de Jatropha y generó un aumento de BTE comparándolo con el biodiésel puro.	[89]
NO_x	Con la mezcla del biodiésel y CNT logró aumentar el BTE.	[90]
CO, HC y hollín	Con la mezcla del biodiésel y CNT (5 % y 20 %) mejoró el BTE y se redujo el BSFC.	[76]
NO_{x}	La mezcla de biodiésel (aceite de neem metil éster) con CNT logró incrementar el BTE y por aumento del número de cetano se acortó el retardo de encendido porque mejoró la combustión.	[91]
Hollín	Con la mezcla de CNT, nanopartículas de óxido de cerio y diesterol se obtuvo una mezcla para combustión y mejor rendimiento en motor.	[92]

Por lo que una nueva alternativa se puede obtener con nanopartículas orgánicas como las cáscaras de coco que se pueden mezclar con biodiésel y aplicarlas en el motor diésel [93]. En la Tabla 12 se presentan las características técnicas de la relación biodiésel.

Biodiésel + nanopartículas					
Propiedades	Aceite de alga $+ \text{TiO}_2\text{-SiO}_250$	Aceite de mahua + ANP50	Aceite de soja + alúmina	Aceite de neem + CNT100	Aceite de Jatropha + 100 CNT
Densidad (kg/m^3)	817	827.5	-	889	899.4
Viscosidad cinemática a 40 °C (cSt)	3.03	3.37	3.37	4.28	5.76
Punto de inflamación °C	62.45	-	-	181	125
Número de cetano	48	49.5	52	53	55
Valor calorífico (kJ/kg)	42,600	41,665	42,590	40,920	37,350
Referencia	[81]	[83]	[85]	[91]	[89]

Tabla 12. Características técnicas del biodiésel con nanopartículas

10. Conclusiones

Debido al alto costo del biodiésel en su producción y algunas propiedades adversas como puede ser su bajo valor calorífico, la alta viscosidad y densidad (comparado con el diésel convencional), obligan a realizar algunas estrategias para que el biodiésel se vuelva más atractivo en su aplicación. Hemos concluido que dos alternativas pueden favorecer en su aplicación en el futuro, la primera se refiere en encontrar una mezcla favorable que justifique la aplicación del biodiésel a escala comercial; la segunda opción es usar el biodiésel como combustible piloto, que requiere una relación entre el 10~% y 20~% del combustible total del motor, logrando con esto la aplicación y el impulso de otros tipos de biocombustibles como los combustibles gaseosos en el motor diésel dual.

Referencias

- [1] G. T. Kalghatgi, "The outlook for fuels for internal combustion engines," *International Journal of Engine Research*, vol. 15, no. 4, pp. 383–398, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/1468087414526189
- [2] G. Kalghatgi, "Developments in internal combustion engines and implications for combustion science and future transport fuels," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 35, no. 1, pp. 101–115, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.10.002

- [3] F. Barraj and Y. Attalah, "Composite sustainable indicators framework for cost assessment of land transport mode in lebanon cities," *Journal of Transportation Technologies*, vol. 8, pp. 232–253, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.4236/jtts.2018.83013
- [4] H. Rashedul, H. Masjuki, M. Kalam, A. Ashraful, S. Ashrafur Rahman, and S. Shahir, "The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 348–364, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.034
- [5] O. M. Ali, R. Mamat, N. R. Abdullah, and A. A. Abdullah, "Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel-diesel blended fuel," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 59–67, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.103
- [6] G. Knothe, "Biodiesel and renewable diesel: A comparison," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 36, no. 3, pp. 364–373, 2010. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.004
- [7] M. Canakci and M. Hosoz, "Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 1, no. 4, pp. 379–394, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/15567240500400796

- [8] S. Chandra Sekhar, K. Karuppasamy, N. Vedaraman, A. Kabeel, R. Sathyamurthy, M. Elkelawy, and H. Alm ElDin Bastawissi, "Biodiesel production process optimization from pithecellobium dulce seed oil: Performance, combustion, and emission analysis on compression ignition engine fuelled with diesel/biodiesel blends," Energy Conversion and Management, vol. 161, pp. 141–154, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.074
- [9] K. Purushothaman and G. Nagarajan, "Performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine operating on neat orange oil," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 242–245, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.012
- [10] M. Xie, Z. J. Ma, Q. H. Wang, and J. Liu, "Investigation of engine combustion and emission performance fuelled with neat pode and pode/diesel blend," *Journal of Xi'an Jiaotong University*, vol. 51, no. 3, pp. 32–37, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.7652/xjtuxb201703006
- [11] M. H. M. Yasin, R. Mamat, A. F. Yusop, P. Paruka, T. Yusaf, and G. Najafi, "Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on a diesel engine fuelled with palm-biodiesel," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 30–36, 2015, clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015). [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.131
- [12] K. Venkateswarlu, K. V. Kumar, B. S. R. Murthy, and V. V. Subbarao, "Effect of exhaust gas recirculation and ethyl hexyl nitrate additive on biodiesel fuelled diesel engine for the reduction of noxemissions," Frontiers in Energy, vol. 6, no. 3, pp. 304–310, Sep 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11708-012-0195-9
- [13] H. Raheman and S. Ghadge, "Performance of compression ignition engine with mahua (madhuca indica) biodiesel," Fuel, vol. 86, no. 16, pp. 2568–2573, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.019
- [14] R. Vallinayagam, S. Vedharaj, W. Yang, P. Lee, K. Chua, and S. Chou, "Pine oil-biodiesel blends: A double biofuel strategy to completely eliminate the use of diesel in a diesel engine," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 466–473, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.025
- [15] P. Singh, S. Chauhan, and V. Goel, "Assessment of diesel engine combustion, performance and emission characteristics fuelled

- with dual fuel blends," Renewable Energy, vol. 125, pp. 501–510, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.105
- [16] G. Kasiraman, B. Nagalingam, and M. Balakrishnan, "Performance, emission and combustion improvements in a direct injection diesel engine using cashew nut shell oil as fuel with camphor oil blending," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 116–124, 2012, Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.022
- [17] P. Dubey and R. Gupta, "Effects of dual bio-fuel (jatropha biodiesel and turpentine oil) on a single cylinder naturally aspirated diesel engine without egr," Applied Thermal Engineering, vol. 115, pp. 1137–1147, 2017. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.125
- [18] A. Sharma and S. Murugan, "Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios," Energy Conversion and Management, vol. 93, pp. 289–297, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.023
- [19] Y. Liu, J. Li, and C. Jin, "Fuel spray and combustion characteristics of butanol blends in a constant volume combustion chamber," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 1059–1069, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.047
- [20] L. Zhu, C. Cheung, W. Zhang, and Z. Huang, "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends," *Fuel*, vol. 90, no. 5, pp. 1743–1750, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.024
- [21] G. Khoobbakht, M. Karimi, and K. Kheiralipour, "Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1385–1394, 2019. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.025
- [22] C. Zhan, Z. Feng, W. Ma, M. Zhang, C. Tang, and Z. Huang, "Experimental investigation on effect of ethanol and di-ethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure," Fuel, vol. 218, pp. 1–11, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.038
- [23] H. Imdadul, H. Masjuki, M. Kalam, N. Zulkifli, A. Alabdulkarem, M. Kamruzzaman, and M. Rashed, "A comparative study of C4 and C5 alcohol treated diesel-biodiesel blends in terms of

- diesel engine performance and exhaust emission," Fuel, vol. 179, pp. 281–288, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.003
- [24] H. Venu and V. Madhavan, "Effect of Al₂O₃ nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics," Fuel, vol. 186, pp. 176–189, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046
- [25] H. Aydin and C. Ilkılıc, "Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine," Applied Thermal Engineering, vol. 30, no. 10, pp. 1199–1204, 2010. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.037
- [26] B. J. Bora and U. K. Saha, "Comparative assessment of a biogas run dual fuel diesel engine with rice bran oil methyl ester, pongamia oil methyl ester and palm oil methyl ester as pilot fuels," Renewable Energy, vol. 81, pp. 490–498, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.019
- [27] M. Zaharin, N. Abdullah, G. Najafi, H. Sharudin, and T. Yusaf, "Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 79, pp. 475–493, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.035
- [28] Y. Noorollahi, M. Azadbakht, and B. Ghoba-"The effect of different dian, diesterol (diesel-biodiesel-ethanol) blends on air-cooled diesel engine performance its exhaust gases," Energy, vol. 142, pp. 196–200, 2018. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.024
- [29] L. Wei, C. Cheung, and Z. Ning, fects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine," Energy, vol. 155, pp. 957–970, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.049
- [30] F. Aydın and H. Öğüt, "Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions," Renewable Energy, vol. 103, pp. 688–694, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.083
- [31] M. Parthasarathy, J. Isaac JoshuaRamesh Lalvani, B. Dhinesh, and K. Annamalai, "Effect of hydrogen on ethanol-biodiesel blend on performance and emission characteristics of a direct injection

- diesel engine," Ecotoxicology and Environmental Safety, vol. 134, pp. 433–439, 2016, Green Technologies for Environmental Pollution Control and Prevention (Part 2). [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.005
- [32] T. Shudo, A. Fujibe, M. Kazahaya, Y. Aoyagi, I. Hajime, Y. Goto, and A. Noda, "The cold flow performance and the combustion characteristics with ethanol blended biodiesel fuel," in Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition. SAE International, oct 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/2005-01-3707
- [33] A. Paul, R. Panua, and D. Debroy, "An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a ci engine fueled by diesel-ethanol-biodiesel blends," Energy, vol. 141, pp. 839–852, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.137
- D. B. Hulwan and S. V. Joshi, "Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content," Applied Energy, vol. 88, no. 12, pp. 5042-5055, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.008
- Z.-H. Zhang and R. Balasubramanian, "Inves-[35]tigation of particulate emission characteristics of a diesel engine fueled with higher alcohols/biodiesel blends," Applied Energy, vol. 163, pp. 71–80, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.173
- [36] V. Soloiu, M. Duggan, H. Ochieng, S. Harp, J. Weaver, C. Jenkins, and B. Vlcek, "Premixed charge of n-butanol coupled with direct injection of biodiesel for an advantageous Soot- NO_x tradeoff," in SAE 2013 World Congress & Exhibition. SAE International, apr 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.4271/2013-01-0916
- [37] J. Hou, Z. Wen, Z. Jiang, and X. Qiao, "Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends," Journal of the Energy Institute, vol. 87, no. 2, pp. 102-113, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.021
- [38] K. Yang, L. Wei, C. Cheung, C. Tang, and Z. Huang, "The effect of pentanol addition on the particulate emission characteristics of a biodiesel operated diesel engine," Fuel, vol. 209, pp. 132–140, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.093

- [39] R. Sridhar, J. Jeevahan, and M. Chandrasekaran, "Effect of the addition of 1-pentanol on engine performance and emission characteristics of diesel and biodiesel fuelled single cylinder diesel engine," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 58–63, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1443505
- [40] V. Sriram, J. Jeevahan, G. Mageshwaran, G. B. Joseph, and R. B. Durairaj, "Engine performance and emission characteristics of 1-octanol blended bio-diesel in a single cylinder diesel engine," *International Journal of Mechanical and Production*, vol. 7, no. 6, pp. 623–630, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.24247/jjmperddec201770
- [41] N. Yilmaz, A. Atmanli, and F. M. Vigil, "Quaternary blends of diesel, biodiesel, higher alcohols and vegetable oil in a compression ignition engine," Fuel, vol. 212, pp. 462–469, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.050
- [42] D. Babu and R. Anand, "Effect of biodiesel-diesel-n-pentanol and biodiesel-dieseln-hexanol blends on diesel engine emission and combustion characteristics," *Energy*, vol. 133, pp. 761–776, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.103
- [43] D. Barik and S. Murugan, "Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of karanja methyl ester (kme)-biogas fueled dual fuel diesel engine," Fuel, vol. 164, pp. 286-296, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.094
- [44] M. Vinod Babu, K. Madhu Murthy, and R. G. Amba Prasad, "Butanol and pentanol: The promising biofuels for CI engines a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 78, pp. 1068–1088, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.038
- [45] B. Sahoo, "Clean development mechanism potential of compression ignition diesel engines using gaseous fuels in dual fuel mode," Ph.D. dissertation, Indian Institute of Technology Guwahati, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/3oGiWJA
- [46] C. Luijten and E. Kerkhof, "Jatropha oil and biogas in a dual fuel CI engine for rural electrification," Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 2, pp. 1426–1438, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.005
- [47] A. Hasannuddin, J. Wira, S. Sarah, M. Ahmad, S. Aizam, M. Aiman, S. Watanabe, N. Hirofumi, and M. Azrin, "Durability studies of single cylinder diesel engine running on emulsion fuel," *Energy*,

- vol. 94, pp. 557–568, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.144
- [48] K. Ramalingam, A. Kandasamy, L. Subramani, D. Balasubramanian, and J. Paul James Thadhani, "An assessment of combustion, performance characteristics and emission control strategy by adding anti-oxidant additive in emulsified fuel," Atmospheric Pollution Research, vol. 9, no. 5, pp. 959–967, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.007
- [49] A. Hasannuddin, J. Wira, S. Sarah, W. Wan Syaidatul Aqma, A. Abdul Hadi, N. Hirofumi, S. Aizam, M. Aiman, S. Watanabe, M. Ahmad, and M. Azrin, "Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel," *Energy Conversion and Management*, vol. 117, pp. 548–557, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.057
- [50] M. Abedin, A. Imran, H. Masjuki, M. Kalam, S. Shahir, M. Varman, and A. Ruhul, "An overview on comparative engine performance and emission characteristics of different techniques involved in diesel engine as dual-fuel engine operation," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 60, pp. 306–316, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.118
- [51] S. H. Yoon and C. S. Lee, "Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a ci engine," Fuel Processing Technology, vol. 92, no. 5, pp. 992–1000, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.12.021
- [52] X. Yuan, X. Ding, L. Leng, H. Li, J. Shao, Y. Qian, H. Huang, X. Chen, and G. Zeng, "Applications of bio-oil-based emulsions in a DI diesel engine: The effects of bio-oil compositions on engine performance and emissions," *Energy*, vol. 154, pp. 110–118, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.118
- [53] G. Kannan and R. Anand, "Experimental investigation on diesel engine with diestrol-water micro emulsions," *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1680–1687, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.062
- [54] A. B. Koc and M. Abdullah, "Performance and NOx emissions of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel-water nanoemulsions," Fuel Processing Technology, vol. 109, pp. 70–77, may 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.039

- [55] A. Sarvi, C.-J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, "Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. influence of engine operation mode and turbocharger," Fuel Processing Technology, vol. 89, no. 5, pp. 510–519, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.10.006
- [56] R. Prakash, R. Singh, and S. Murugan, "Experimental investigation on a diesel engine fueled with bio-oil derived from waste wood-biodiesel emulsions," Energy, vol. 55, [Online]. 610-618. 2013. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.085
- [57] —, "Experimental studies on combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using different biodiesel bio oil emulsions," Journal of the Energy Institute, vol. 88, no. 1, pp. 64–75, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.005
- [58] A. Paul, R. S. Panua, D. Debroy, and P. K. Bose, "Effect of compressed natural gas dual fuel operation with diesel and pongamia pinnata methyl ester (PPME) as pilot fuels on performance and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine," Energy, vol. 68, pp. 495–509, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.026
- [59] L. Tarabet, M. Lounici, K. Loubar, K. Khiari, R. Bouguessa, and M. Tazerout, "Hydrogen supplemented natural gas effect on a DI diesel engine operating under dual fuel mode with a biodiesel pilot fuel," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. 11, pp. 5961–5971, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.045
- [60] K. Ryu, "Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel," Energy Conversion and Management, vol. 76, pp. 506–516, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.085
- [61] R. Senthilraja, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham, and N. Nedunchezhian, "Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with diesel-ethanol - cotton seed oil methyl ester blends and compressed natural gas (CNG) as fuel," Energy, vol. 112, pp. 899–907, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.114
- [62] S. S. Kalsi and K. Subramanian, "Experimental investigations of effects of hydrogen blended CNG on performance, combustion and emissions characteristics of a biodiesel fueled reactivity

- controlled compression ignition engine (RCCI)," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 7, pp. 4548–4560, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.147
- [63] V. Chintala and K. Subramanian, "A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 70, pp. 472–491, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.24788
- [64] E. Uludamar, Şafak Yıldızhan, K. Aydın, and M. Özcanlı, "Vibration, noise and exhaust emissions analyses of an unmodified compression ignition engine fuelled with low sulphur diesel and biodiesel blends with hydrogen addition," International Journal of Hudrogen Energy, vol. 41. no. 26, pp. 11 481–11 490, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.179
- [65] T. Korakianitis, A. Namasivayam, and R. Crookes, "Hydrogen dual-fuelling of compression ignition engines with emulsified biodiesel as pilot fuel," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35, no. 24, pp. 13329-13344, 2010, 3rd Asian Bio Hydrogen Symposium. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.007
- [66] M. Senthil Kumar, A. Ramesh, and B. Nagalingam, "Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 28, no. 10, pp. 1143–1154, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00234-3
- M. O. Hamdan and M. Y. Selim, "Performance of CI engine operating with hydrogen supplement co-combustion with jojoba methyl ester," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, no. 24, pp. 10255–10264, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.168
- [68] H. Masjuki, A. Ruhul, N. N. Mustafi, M. Kalam, M. Arbab, and I. Rizwanul Fattah, "Study of production optimization and effect of hydroxyl gas on a CI engine performance and emission fueled with biodiesel blends," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, no. 33, pp. 14519–14528, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.273
- [69] M. G. Shirk, T. P. McGuire, G. L. Neal, and D. C. Haworth, "Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, no. 23, pp. 7237–7244, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.128

- [70] M. Senthil Kumar and M. Jaikumar, "Studies on the effect of hydrogen induction on performance, emission and combustion behaviour of a WCO emulsion based dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 32, pp. 18440–18450, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.124
- [71] K. A. Subramanian and V. Chintala, "Reduction of GHGs emissions in a biodiesel fueled diesel engine using hydrogen," Oct 2013, volume
 2: Fuels; Numerical Simulation; Engine Design, Lubrication, and Applications. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/ICEF2013-19133
- [72] K. Varatharajan and M. Cheralathan, "Effect of aromatic amine antioxidants on NO_x emissions from a soybean biodiesel powered DI diesel engine," Fuel Processing Technology, vol. 106, pp. 526–532, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.023
- [73] H. Rashedul, H. Masjuki, M. Kalam, Y. Teoh, H. How, and I. Rizwanul Fattah, "Effect of antioxidant on the oxidation stability and combustion-performance-emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel blend," Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 849–858, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.024
- [74] K. Ryu, "The characteristics of performance and exhaust emissions of a diesel engine using a biodiesel with antioxidants," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 1, Supplement, pp. S78–S82, 2010, Supplement Issue on Recent Developments of Biomass Conversion Technologies. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.034
- [75] C. Dueso, M. Muñoz, F. Moreno, J. Arroyo, N. Gil-Lalaguna, A. Bautista, A. Gonzalo, and J. L. Sánchez, "Performance and emissions of a diesel engine using sunflower biodiesel with a renewable antioxidant additive from bio-oil," Fuel, vol. 234, pp. 276–285, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.013
- [76] S. H. Hosseini, A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, and A. Abbaszadeh-Mayvan, "Performance and emission characteristics of a ciengine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 201–213, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.013
- [77] A. F. Chen, M. Akmal Adzmi, A. Adam, M. F. Othman, M. K. Kamaruzzaman, and A. G. Mrwan, "Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel

- engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide," *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 461–477, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.004
- [78] M. Mirzajanzadeh, M. Tabatabaei, M. Ardjmand, A. Rashidi, B. Ghobadian, M. Barkhi, and M. Pazouki, "A novel soluble nano-catalysts in diesel-biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions," *Fuel*, vol. 139, pp. 374–382, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.008
- [79] A. Srinivas, P. J. Rao, G. Selvam, P. B. Murthy, and P. N. Reddy, "Acute inhalation toxicity of cerium oxide nanoparticles in rats," *Toxicology Letters*, vol. 205, no. 2, pp. 105–115, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2011.05.1027
- [80] S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, M. Ebadi, and T. Yusaf, "Novel environmentally friendly fuel: The effects of nanographene oxide additives on the performance and emission characteristics of diesel engines fuelled with ailanthus altissima biodiesel," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 283–294, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.104
- [81] S. Karthikeyan and A. Prathima, "Environmental effect of ci engine using microalgae methyl ester with doped nano additives," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 50, pp. 385–396, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.028
- [82] R. D'Silva, K. Binu, and T. Bhat, "Performance and emission characteristics of a C.I. engine fuelled with diesel and TiO₂ nanoparticles as fuel additive," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, no. 4, pp. 3728–3735, 2015, 4th International Conference on Materials Processing and Characterzation. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.162
- [83] C. S. Aalam and C. Saravanan, "Effects of nano metal oxide blended mahua biodiesel on CRDI diesel engine," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 689–696, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.013
- [84] V. Arul, A. Selvan V, A. r b, and M. Udayakumar, "Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4, 09 2009. [Online]. Available: https://bit.ly/3qgUUoW

- "Influence of [85] T. Shaafi and R. Velraj, alumina nanoparticles, ethanoland propanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions," Renewable Energy, vol. 80, pp. 655–663, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.042
- [86] T. Özgür, M. Özcanli, and K. Aydin, "Investigation of nanoparticle additives to biodiesel for improvement of the performance and exhaust emissions in a compression ignition engine," International Journal of Green Energy, vol. 12, no. 1, pp. 51–56, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/15435075.2014.889011
- [87] D. Ganesh and G. Gowrishankar, "Effect of nano-fuel additive on emission reduction in a biodiesel fuelled CI engine," in 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011, pp. 3453–3459. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6058240
- [88] S. Senthur Prabu, M. Asokan, R. Roy, S. Francis, and M. Sreelekh, "Performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel/diesel blends with additives," Energy, vol. 122, pp. 638–648, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.119
- [89] J. Sadhik Basha and R. Anand, "Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using carbon nanotubes blended jatropha methyl ester emul-

- sions," Alexandria Engineering Journal, vol. 53, no. 2, pp. 259–273, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.001
- P. Tewari, E. Doijode, N. Banapurmath, and V. Yaliwal, "Experimental investigations on a diesel engine fuelled with multi-walled carbon nanotubes blended biodiesel fuels," International Journal of Automotive Engineering and Technoloqies, vol. 4, pp. 129–138, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.18245/ijaet.59113
- B. Gnanasikamani, "Effect of cnt as additive with biodiesel on the performance and emission characteristics of a DI diesel engine," International Journal of ChemTech Research, vol. 7, pp. 1230–1236, 02 2015. [Online]. Available: https://bit.ly/43dFnF9
- [92] V. Arul Mozhi Selvan, R. Anand, and M. Udayakumar, "Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives in diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine," Fuel, vol. 130, pp. 160–167, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034
- [93] K. Vinukumar, A. Azhagurajan, S. Vettivel, N. Vedaraman, and A. Haiter Lenin, "Biodiesel with nano additives from coconut shell for decreasing emissions in diesel engines," Fuel, vol. 222, pp. 180–184, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.129





Propuesta metodológica para la protección de distancia en líneas de transmisión ante la integración de energías renovables no convencionales

Methodological Proposal for Distance Protection in Transmission Lines for Integration of Non-conventional Renewable Energies

M. F. Velasco^{1,*}, Génesis Maliza Paladines¹, Fernando Vaca-Urbano¹

Recibido: 25-01-2023, Recibido tras revisión: 21-04-2023, Aceptado: 18-05-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

Este artículo propone una metodología para ajustar la protección de distancia (ANSI-21) en sistemas de potencia que integran energías renovables no convencionales (ERNC). Se utiliza el sistema New England de 9 barras IEEE modificado como caso de estudio, con un parque eólico compuesto por 33 aerogeneradores de 2.5 MW y sistemas de control validados según estándares internacionales, como el IEC60909-2016. Se considera un valor de resistencia de falla calculado mediante el método de Warrintong. Los ajustes propuestos se simulan utilizando el software Digsilent Power Factory® v un relé Siemens 7SA522 con características cuadrilaterales. La metodología se basa en el uso de datos de voltaje y corriente de los transformadores de instrumentación para calcular la impedancia de la línea hasta el punto de falla. El método adaptativo propuesto demuestra un rendimiento positivo en distintos escenarios de cortocircuito, donde varían el lugar de la falla, la resistencia de la misma y las fluctuaciones de potencia del parque generador. Esto demuestra que el relé actúa en la zona de protección adecuada de manera efectiva.

Palabras clave: Protección de distancia, característica cuadrilateral, parque eólico, resistencia de falla, fuentes basadas en inversores

Abstract

This paper presents a methodology to set the distance protection (ANSI-21) in power systems that integrate nonconventional renewable energies (NCRE). The modified IEEE 9-bar New England system is used as a case study, with a wind farm comprising 33 2.5 MW wind turbines and control systems validated according to international standards, such as the IEC60909-2016. A fault resistance value calculated using the Warrington method is considered. The proposed settings are simulated using the Digsilent Power Factory® software and a Siemens 7SA522 relay with quadrilateral characteristics. The methodology uses voltage and current data from the instrumentation transformers to calculate the line impedance up to the fault point. The proposed adaptive method demonstrates positive performance under different shortcircuit scenarios, where the fault location, fault resistance, and power fluctuations of generating park are varied. This indicates that the relay effectively operates in the appropriate protection zone.

Keywords: Distance protection, adaptive relay, adaptive quadratic characteristic, wind farms, fault resistance, inverter-based sources.

Forma sugerida de citación: Velasco, M. F.; Maliza Paladines, G. y Vaca-Urbano, F. "Propuesta metodológica para la protección de distancia en líneas de transmisión ante la integración de energías renovables no convencionales," *Ingenius*, *Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 106-119, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.09.

¹,*Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador Autor para correspondencia ☒: mfvelasc@espol.edu.ec.

1. Introducción

El ingreso de las ERNC puede poner en peligro la coordinación del alcance de las zonas de protección de los relés de distancia [1], principalmente debido a la naturaleza estocástica de sus recursos [2]. Por lo tanto, es necesario considerar una modificación, análisis y rediseño de las protecciones para que puedan adaptarse a la variación de la corriente de falla provocada por las energías renovables [3].

El relé de distancia calcula la impedancia aparente al punto de falla mediante las mediciones de tensión y corriente, y compara este valor con la impedancia de ajuste para determinar la zona de actuación. La diferencia entre las centrales convencionales y las fuentes basadas en inversores radica en la contribución de corriente en un escenario de falla. Normalmente, una central convencional aporta entre 5 a 6 veces la corriente nominal, a diferencia de las fuentes renovables cuya corriente de falla se encuentra entre 1.1 a 2 veces [3], y por ende las componentes de secuencia son distintas entre estos dos tipos de fuentes. Debido a esta diferencia, varios autores han planteado posibles soluciones para evitar el problema de subalcance y sobrealcance de la protección de distancia.

Otro punto que se debe considerar al calcular un escenario de cortocircuito es la resistencia de falla, la cual puede ocasionar problemas de subalcance en los relés de distancia. Para mejorar el funcionamiento de la protección ante esta situación, se propone el uso de nuevos algoritmos de estimación de la impedancia de la línea que integran la resistencia de falla en fuentes de generación síncrona [4]. Además, [5] utiliza la característica de tipo MHO para ajustar la zona de protección y resolver los problemas de operación del relé en plantas fotovoltaicas.

Por otro lado, [6] propone una metodología de ajuste utilizando la característica cuadrilateral, teniendo como resultado el cambio del límite de actuación del relé durante la variación de la impedancia medida, debido a la inserción de la resistencia de falla.

En este artículo se presenta una metodología de protección de distancia de la característica cuadrilateral para proteger las líneas de transmisión conectadas a fuentes de energía renovales no convencionales, como parques eólicos, con la finalidad de mejorar el ajuste de las zonas de operación del relé cuando el sistema enfrenta fallas de fase con resistencias de falla, las cuales pueden hacer que la impedancia aparente calculada por el equipo sea notablemente mayor.

Las contribuciones de este artículo incluyen:

- Modelamiento detallado de la ERNC para verificar las aportaciones de corriente de falla vistas por el relé de protección.
- Desarrollo de un método de ajuste basado en el cálculo de corrientes de cortocircuito de fase al 80 % y 20 % de la longitud de las líneas principal y adyacente. Esta expresión matemática permite la variación independiente de la resistencia y reactancia en el plano R-X, lo cual resuelve el problema de subalcance del relé al tener en cuenta la resistencia de falla.
- El funcionamiento de la metodología propuesta ha sido constatado mediante datos de simulación para diferentes tipos de falla y a generación variable del parque eólico.

El resto de este documento se organiza como sigue. En la sección 2 se presenta los conceptos básicos de la protección de distancia con característica cuadrilateral ante la integración de ERNC, se brinda una breve descripción del esquema eléctrico a estudiar y los efectos de la resistencia de falla dentro de un evento de cortocircuito. En la sección 3 se detalla la metodología propuesta, y los resultados que evalúan su desempeño en diferentes situaciones se presentan en la sección 3.2. La discusión sobre la metodología planteada se fundamenta en la sección 3.3 y, finalmente, las conclusiones del trabajo se exponen en la sección 4.

2. Materiales y métodos

2.1. Protecciones eléctricas de un sistema de potencia ante la inserción de las ERNC

Las fallas en un sistema de potencia pueden provocar daños en los elementos, por eso es indispensable minimizar su efecto a través de un sistema de protecciones que lo vuelven más confiable y seguro [7]. La línea de transmisión, al ser el elemento más vulnerable del sistema, cuenta con una protección primaria (relé de distancia). En esta sección, se dará a conocer su principio de operación y sus características [8].

2.2. Descripción del sistema

Para el caso de estudio, se ha considerado el sistema New England de 9 barras IEEE [9] de 230 kV a 60 Hz, como se muestra en la Figura 1. Se procede a dividir el sistema en dos sectores: el 1 está compuesto por las barras de color gris, mientras que el 2 se compone de los elementos de color negro.

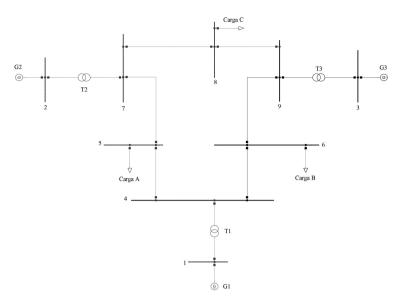


Figura 1. Caso de estudio Sistema IEEE 9 barras [9]

2.3. Red equivalente del sistema modificado

El sector 1 será reemplazado por un circuito equivalente calculado mediante el método de REI, que se deriva de "radial", "equivalente" e "independiente" [10]. El cual separa el sistema en sectores activos y pasivos con el objetivo de agrupar los sectores pasivos en una

barra común o equivalente, la misma que contiene los valores de corriente y potencia de cortocircuito trifásico y monofásico en la barra común, así como también la constante de inercia de los generadores del sistema.

Los parámetros característicos de la red equivalente conectada al sistema mostrado en la Figura 2 son detallados en la Tabla 1.

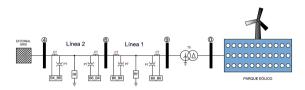


Figura 2. Sistema equivalente de New England de 9 barras modificado [9]

Tabla 1. Datos de la red equivalente

Red Externa						
Tipo de barra	Oscilación					
Punto de Operación						
Magnitud de tensión (V_i) Ángulo de la barra (δ_i)	1.025[p.u] 147.783°					
Datos RMS						
Constante de inercia (H_i)	5.892 [s]					

Para el cambio de la estructura del sistema se considera la inserción de una nueva barra (0), donde se integra el parque eólico, el cual tiene 11 circuitos cada uno con tres aerogeneradores de 2.5 MW conectados en paralelo, dando una capacidad instalada del parque de 82.5 MW.

Los aerogenadores utilizados son propios de la librería de Digsilent Power Factory®; el generador está

acoplado a la red a través de un convertidor de tensión (VSC) con una tecnología full-converter [11] los datos de entrada de estos controladores se detallan en la Tabla 2.

Para el análisis posterior, la longitud de las líneas 1 y 2 son de 100 km, sus parámetros eléctricos son descritos en la Tabla 3:

Tabla 2. Datos del generador eólico tipo full-converter

Controlador de corriente para simulación EMT					
Ganancia proporcional eje d (kd)	5				
Constante de tiempo de integración eje d (Td)	0.01 [s]				
Ganancia proporcional eje q (kq)	5				
Constante de tiempo de integración eje q (Tq)	0.01 [s]				

Tabla 3. Parámetros eléctricos de las líneas

Parámetros	Línea 1	Línea 2					
Impedancias $[\Omega/km]$							
Secuencia positiva $r_{1l} + jx_{1l} = r_{2l} + jx_{2l}$	0.2063 + j 0.8993	0.0899 + j 0.4887					
Secuencia cero $r_{ol} + jx_{0l}$	0.4126 + j 1.7980	0,1799 + j 0.9734					
Cap	$pacitancias [\mu F/km]$						
Secuencia positiva $C_{1l} = C_{2l}$	6.7675	2.9869					
Secuencia cero C_{0l}	3.3838	1.4935					

El transformador tiene una potencia nominal de $150\ MVA$, $230/13.8\ kV$, conexión YnD5, el lado de baja adelanta 150° al lado de alta y la reactancia de cortocircuito es de $8.79\ \%$.

2.4. Característica cuadrilateral del relé de distancia

Dentro de la protección de distancia, la característica cuadrilateral es más versátil, ya que no presenta una reducción en su zona de protección efectiva cuando existe resistencia de falla, mientras la impedancia medida se encuentre dentro del cuadrilátero, el relé funcionará correctamente [12].

2.4.1. Principio básico

La ventaja de este tipo de relé, es que la zona de operación depende solamente de la impedancia del elemento a proteger, lo cual prácticamente se mantiene constante, es decir, no depende de las magnitudes tanto de corriente como de voltaje [13]. La característica cuadrilateral es uno de los métodos más utilizados. Los ejes horizontales de esta protección dependen solo del valor de reactancia "X", mientras que los ejes verticales pueden ser modificados al variar la resistencia "R". Esto se representa en el plano R-X (Figura 3), lo cual resulta en un mayor alcance de protección al momento de la inserción de la resistencia de falla [14].

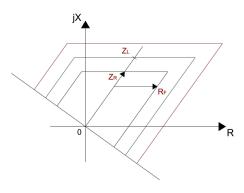


Figura 3. Diagrama R-X. Característica cuadrilateral [14]

La característica cuadrilateral opera si la impedancia medida por el relé se encuentra dentro de la reactancia de carácter positivo y negativo de los lados derecho e izquierdo, descritos en la figura anterior.

Donde:

- $Z_L =$ Impedancia de la línea
- Z_R = Elemento de alcance de distancia
- R_F = Ajuste del alcance resistivo

2.4.2. Zonas de protección del relé

La protección de una línea de transmisión no se puede dar por una única zona, puesto que los transformadores de instrumento deben ser muy precisos, se requiere protecciones de respaldo [1].

El porcentaje asignado a cada zona a proteger se analiza de acuerdo con la característica del relé. En el caso de la característica cuadrilateral, las asignaciones operan de la siguiente manera:

- La zona 1 está configurada para proteger entre el 80 % y el 90 % de la línea donde se produce la falla. El tiempo de actuación del relé es inmediato, $t_1 = 0$ segundos, ya que la protección de distancia debe activarse antes que cualquier otra protección.
- Por otro lado, la zona 2 abarca toda la línea donde ocurrió la falla, junto con el 20 % de la línea adyacente. El tiempo de activación del relé es de $t_2=0.4$ segundos.
- La zona 3 cuenta con un intervalo de tiempo de coordinación de $t_3 = 0.8$ segundos y es capaz de proteger completamente la línea donde ocurrió la falla, así como el 100 % de la línea adyacente [15].

2.4.3. Efectos de la resistencia de falla

La impedancia de una línea de transmisión se distribuye uniformemente a lo largo de su longitud. Esta característica da posibilidad al relé de distancia para identificar entre fallas interiores y exteriores, las cuales podrían variar por la resistencia de falla. Esta resistencia puede surgir por fallas en los aisladores o por la inducción de rayos, y cuando ocurre, genera un arco eléctrico que debe tenerse en cuenta al ajustar el funcionamiento del relé [16].

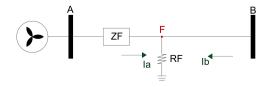


Figura 4. Diagrama de falla trifásica con resistencia de falla [16]

De acuerdo con el diagrama mostrado en la Figura 4, la impedancia vista por el relé con la inserción de la resistencia de falla del sistema se da por medio de la ecuación (1)

$$Z_m = \frac{V_F}{I_F} = Z_F + R_F + \left(\frac{I_a}{I_b}\right) \cdot R_F \tag{1}$$

Donde:

- $Z_m =$ Impedancia medida en las barras A y B
- $Z_F =$ Impedancia de falla
- $R_F = \text{Resistencia de falla}$
- I_a = Corriente medida barra A
- $I_b = \text{Corriente medida barra B}$

En la Figura 3 se puede observar que, en la característica cuadrilateral, la resistencia de falla se encuentra cercana al límite de disparo del relé, esto provoca que la falla sea percibida más lejos de su ubicación real, lo que resulta en un alcance de protección más limitado y tiempos de actuación erróneos, por esta razón es necesario modificar el ajuste típico del relé y utilizar un enfoque adaptativo [13] [16].

2.4.4. Criterios para el ajuste de relé de distancia

Tanto el voltaje como la corriente tomada por los transformadores de potencial (TP) y corriente (TC), son los que estiman la impedancia del relé, la misma que se expresa por $\Omega_{primarios}$, al usar la conversión por la relación entre el TP/TC, la lectura que toma el equipo se da por $\Omega_{secundarios}$, para convertir la impedancia primaria en secundaria se usa la expresión [17], ecuación (2):

$$\frac{V_{primarios}}{I_{primarios}} = Z_{primarios} = \frac{V_{secundarios \cdot R_{TP}}}{I_{secundarios \cdot R_{TC}}}$$
(2)

Para los relés comerciales SIEMENS 7SA522 [17], los ajustes de la protección generalmente tienen la siguiente forma,(tabla 4):

Tabla 4. Reactancias vistas por el relé 7SA522 [17]

$$\begin{split} & \text{Alcance de } X_{secundaria} - Z_1 & R_{TP}/R_{TC} \cdot 80\% \cdot X_{L1} \\ & \text{Alcance de } X_{secundaria} - Z_2 & R_{TP}/R_{TC} \cdot 120\% \cdot X_{L1} \\ & \text{Alcance de } X_{secundaria} - Z_3 & R_{TP}/R_{TC} \left(X_{L1} + X_{L2} \right) \end{split}$$

La característica cuadrilateral presenta una particularidad importante: el ajuste del alcance reactivo y resistivo es independiente. Esta particularidad es útil cuando se tiene una resistencia de falla dentro del

sistema, ya que esto es un parámetro que dificulta la correcta medición del relé de distancia [15]. Al producirse una resistencia de falla genera un arco el cual presenta una resistencia eléctrica, la que puede ser calculada mediante la fórmula de Warrington, presentada en la ecuación (3) [18].

$$R_{arco} = \frac{28707(S + 2.046 \cdot v \cdot t)}{I^{1.4}} \tag{3}$$

Donde:

- S = Distancia de aislamiento fase-fase [m]
- I = Corriente de cortocircuito [A]
- v = Velocidad del viento [m/s]
- t = Tiempo de duración del cortocircuito [s]

La adición de la resistencia de arco no modifica los valores de la impedancia de la línea, por lo que la protección sigue midiendo la reactancia directa de la línea, pero la resistencia vista por el relé, si considera esta resistencia de arco [17], como se explica en la Tabla 5.

Tabla 5. Resistencias vistas por el relé 7SA522 [17].

Alcance de
$$R_{secundaria} - Z_1$$
 $R_{TC}/R_{TP} \cdot R_{L1} + 0.5 \cdot R_{arco}$ Alcance de $R_{secundaria} - Z_2$ $R_{TC}/R_{TP} \cdot R_{L1} + 0.5 \cdot R_{arco}$ Alcance de $R_{secundaria} - Z_3$ $R_{TC}/R_{TP} \cdot R_{L1} + 0.5 \cdot R_{arco}$

3. Resultados y discusión

3.1. Aplicación al caso de estudio

En este apartado se realiza una comparación entre los sistemas de protección de un generador síncrono y un generador eólico con características operativas similares. El objetivo es validar su correcto funcionamiento en los escenarios planteados.

3.1.1. Cálculo de cortocircuito

Para este análisis se realiza el cálculo de cortocircuito por medio del método completo o de superposición, el cual evalúa la corriente de falla en un punto específico de la red, su principal objetivo es verificar si la falla del sistema de protección depende del comportamiento erróneo del relé o de sus ajustes incorrectos. Para dimensionar adecuadamente el equipo de protecciones es necesario conocer dos corrientes de cortocircuito, la máxima dada por una falla trifásica (al principio de la línea) que determina el límite de disparo de los relés y la mínima por una falla fase-neutro (al final de la línea) que sirve para elegir la curva disparo del relé [19].

3.1.2. Corriente de falla

Los sistemas eléctricos alimentados por generadores síncronos por su topología producen fallas trifásicas, bifásicas y monofásicas, lo que afecta al flujo normal de la corriente en las líneas de transmisión. Mientras que los sistemas con fuentes de ERNC (eólica), por su estructura basada en electrónica de potencia, carecen de conexiones a tierra, por tal motivo no posee secuencia cero.

Para proteger el sistema de control del generador eólico, la corriente de falla se encuentra en el rango de 1.1 a 1.5 veces su corriente nominal, en tanto en el generador síncrono el aporte es de 5 a 6 veces la corriente nominal. Esto se puede demostrar en la Tabla 6, que contienen los resultados de la corriente al producirse fallas en diferentes puntos de la línea, cuando el sistema está conectado al generador síncrono y a un parque eólico, evidenciando la premisa que, la corriente de falla es menor en un sistema de generación renovable [20]. El relé R_1 se encuentra conectado a la barra 9 que protege a la línea 1, mientras que el relé R_2 protege a la línea 2 y está instalado en la barra 6 del sistema.

Tabla 6. Comparación de las corrientes de falla de un sistema conectado a un generador síncrono y a un eólico [kA].

Localización de	Generado	or síncrono	Generador eólico		
la falla [%]	Línea 1	Línea 2	Línea 1	Línea 2	
ia iana [70]	R_1	R_2	R_1	R_2	
0	1.18	0.67	0.23	0.20	
10	1.09	0.65	0.23	0.20	
20	1.02	0.63	0.22	0.19	
30	0.95	0.62	0.22	0.19	
40	0.89	0.60	0.21	0.19	
50	0.84	0.59	0.21	0.19	
60	0.80	0.58	0.21	0.19	
70	0.75	0.56	0.20	0.18	
80	0.71	0.55	0.20	0.18	
90	0.68	0.55	0.20	0.18	
100	0.65	0.55	0.19	0.18	

3.1.3. Impedancias de falla

El principio básico de la protección de distancia es medir la impedancia aparente a partir de la relación de corriente y voltaje (V/I). De acuerdo con esta relación, al producirse una falla, si la corriente de cortocircuito aumenta en compensación la caída de voltaje disminuye. Por esta razón, la impedancia se ve afectada ligeramente al variar el nivel de cortocircuito, el tipo de falla o la fuente de alimentación del sistema, demostrando que la impedancia tendrá cambios significativos si la falla presenta una resistencia de falla [21]. Según lo expresado en el párrafo anterior, en la Tabla 7 y 8 se puede demostrar que la impedancia para una falla trifásica y bifásica en una línea de transmisión alimentada por un generador eólico o síncrono es la misma

siempre y cuando la resistencia de falla sea igual a cero.

Tabla 7. Impedancia de falla trifásica.

		Impedancias [Ω] dor síncrono	Generador eólico		
Localización de la falla [%]	Línea 1	Línea 2	Línea 1	Línea 2	
	R_1	R_2	R_1	R_2	
0	0	0	0	0	
10	9,229	4,950	9,229	4,950	
20	18,476	9,901	18,476	9,901	
30	27,756	14,857	27,756	14,857	
40	37,087	19,820	37,087	19,820	
50	46,487	24,791	46,487	24,791	
60	55,973	29,773	55,973	29,773	
70	$65,\!564$	34,768	65,564	34,768	
80	75,278	39,779	75,278	39,779	
90	85,137	44,806	85,137	44,806	
100	$95,\!159$	49,854	95,159	49,854	

Tabla 8. Impedancia de falla bifásica.

		mpedancias $[\Omega]$	~ ,			
Localización de la falla [%]	Genera Línea 1	dor síncrono Línea 2	Generad Línea 1	Generador eólico		
	R_1	R_2	R_1	Línea 2 R_2		
	n_1	11/2	n_1	n_2		
0	0	0	0	0		
10	9,229	4,950	9,229	4,950		
20	18,476	9,901	18,476	9,901		
30	27,756	14,857	27,756	14,857		
40	37,087	19,820	37,087	19,820		
50	$46,\!487$	24,791	46,487	24,791		
60	55,973	29,773	55,973	29,773		
70	$65,\!564$	34,768	65,564	34,768		
80	75,278	39,779	75,278	39,779		
90	85,137	44,806	85,137	44,806		
100	95,159	49,854	95,159	$49,\!854$		

3.1.4. Fluctuación de la generación

Un parque eólico consta de varias unidades conectadas en paralelo, a lo largo del día no todas las unidades pueden estar operativas debido al mantenimiento o la variabilidad de las condiciones climáticas, lo que resulta en una variación en la potencia de salida, es decir, la línea transportará potencia variable. Estos cambios podrían representar un mal funcionamiento del relé de distancia ante una falla [22]. En la Figura 5 se observa la potencia activa generada por el parque eólico a lo largo del día, destacando dos momentos, a las 16:00 horas la potencia del parque alcanza su máxima generación diaria de 47.91 MW y a las 7:00 horas la generación es mínima con 9.53 MW.

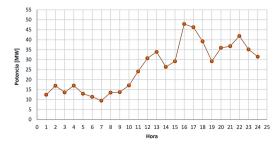


Figura 5. Generación por hora del parque eólico

Al calcular el cortocircuito en la línea, variando la localización de la falla y la generación del parque eólico, se evalúan las impedancias de falla a potencia instalada (82.50 MW), máxima operativa (47.91 MW),

mínima operativa (9.53 MW), nuevamente se evidencia que la impedancia vista por el relé es la misma en los tres escenarios de operación y con resistencia de falla cero. (Tabla 9)

Tabla 9. Impedancia de falla evaluada a generación del parque eólico fluctuante con Rf=0

	Potencia máxima operativa		Potencia r	nínima operativa	Potencia nominal	
Localización de la falla [%]	Línea 1 R_1	Línea 2 R_2	Línea 1 R_1	Línea 2 $$R_{2}$$	Línea 1 R_1	Línea 2 R_2
0	0	0	0	0	0	0
10	9,229	4,950	9,229	4,950	9,229	4,950
20	18,476	9,901	18,476	9,901	18,476	9,901
30	27,756	14,857	27,756	14,857	27,756	14,857
40	37,087	19,820	37,087	19,820	37,087	19,820
50	46,487	24,791	46,487	24,791	46,487	24,791
60	55,973	29,773	55,973	29,773	55,973	29,773
70	65,564	34,768	$65,\!564$	34,768	$65,\!564$	34,768
80	75,278	39,779	75,278	39,779	75,278	39,779
90	85,137	44,806	85,137	44,806	85,137	44,806
100	95,159	49,854	95,159	49,854	95,159	49,854

3.1.5. Método de ajuste adaptativo

En la sección 2 se explica la influencia de la resistencia de falla durante el cálculo de cortocircuito en una línea de transmisión, un subalcance en la protección podría provocar disparos erróneos del relé, por ello el ajuste típico del equipo debe ser modificado por uno adaptativo.

El método de ajuste adaptativo cuadrilateral permite la variación individual de la resistencia y reactancia en el plano R-X, provocando un incremento en las zonas de protección. Esto ayuda al sistema a tener mayor flexibilidad y precisión al momento de la inserción de la resistencia de falla.

La característica del relé cuadrilateral adaptativa ajustada para la zona 1 se puede representar de la siguiente manera: ecuación (4).

$$Z_{set}^{adap} = Z_{set} = 0.8Z_l = \frac{V_{cc_80\%Z_m}}{I_{cc_80\%Z_m}}$$
(4)

Donde Z_{set} es la impedancia de ajuste convencional del relé, la cual representa un cortocircuito al 80 % de la línea 1, ubicada en la barra 9-6 (Figura 2). Al momento de referirnos a las zonas de protección 2 y 3, se deberá analizar la línea adyacente ubicada en las barras 6-4.

Cuando ocurre una falla y la resistencia de falla es igual a cero, la impedancia $Z_m = xZ_{L_1}$, donde x representa el porcentaje de localización de la falla. Sin embargo, cuando la resistencia de falla es diferente de cero, ocasiona un cambio en ΔZ , provocando un error en la impedancia medida Z_m y en la impedancia de falla xZ_{L_1} .

Para evitar mediciones erróneas del relé, en la Figura 6 por medio del plano R-X, se representa el incremento de la impedancia medida Z_m ; a la nueva

impedancia se la determina por Z_{set}^{adap} . Este es el nuevo ajuste de protección al momento de producirse una falla.

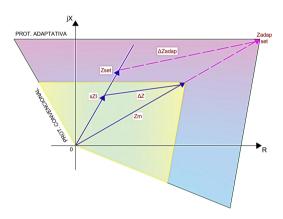


Figura 6. Principio básico de la característica cuadrilateral adaptativa en una falla interna

Para implementar el método adaptativo en la zona 2 se calcula un cortocircuito al 20 % de la línea adyacente (L_2) y para la zona 3 un cortocircuito al 100 % de L_2 . El ajuste adaptativo del relé se describe a continuación:

Zona 2: equación (5).

$$Z_{2set}^{adap} = \frac{V_{CC_20\%L_2}}{I_{CC_{20\%L_2}}} \tag{5}$$

Zona 3: equación (6).

$$Z_{3set}^{adap} = \frac{V_{CC_100\%L_2}}{I_{CC\ 100\%L_2}} \tag{6}$$

Donde:

- $Z_{adap} =$ Impedancia adaptativa
- $V_{cc-80\%}=$ Tensión de cortocircuito al 80 % de L_1

integración de energías renovables no convencionales

- $I_{cc-80\%}$ = Corriente de cortocircuito al 80 % de L_1
- $V_{cc-20\%}$ = Tensión de cortocircuito al 20 % de L_2
- $I_{cc-20\%}$ = Corriente de cortocircuito al 20 % de L_1
- $V_{cc-100\%}$ = Tensión de cortocircuito al 100 % de L_2
- $I_{cc-100\%} = \text{Corriente}$ de cortocircuito al 100 % de I_{c1}

DEFINIR LOS VALORES DE MEDIANTE EL MÉTODO REI CALCULAR F₁₁ + f₁₂ + f₁₂ 1 FIJAR LOS VALORES DE POTENCIA (Prinf y Que) ESTABLECER LOS DATOS DEL SISTEMA DE CONTROI (vid. 17, 18, 17, 19) APLICAR COPTOCIBICUITO MEDIANTE EL MÉTODO COMPLETO VERIFICAR LAS APORTACIONES DE CORRIENTE EN FALLAS TRIFÁSICAS, BIFÁSICAS BIFÁSICAS APLICAR MÉTODO ADAPTATIVO APLICAR MÉTODO ADAPTATIVO OBTENER LOS VALORES MEDIDIOS DE VOLTAJES Y CONTROITE CORRIENTES MEDIDIOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES DE RECTANCIA DE LA LÍNEA (XL.) APLICAR MÉTODO CONVENCIONAL APLICAR MÉTODO CONVENCION

Figura 7. Diagrama de flujo para el ajuste cuadrilateral adaptativo propuesto

3.1.6. Diagrama de flujo

La Figura 7 muestra el diagrama de flujo del método propuesto. Para la aplicación de este, al sistema base se debe aplicar un modelo equivalente mediante el método de REI. Luego se establecen los parámetros de secuencia positiva, negativa y cero de las líneas de transmisión, seguido de esto se ingresa los valores de potencia antes de la falla, al conectar el parque eólico considerar los datos de entrada del controlador. Finalmente, se calcula un cortocircuito trifásico con resistencia de falla de 0 v 25 Ω Cuando el valor de resistencia de falla es 0, se utiliza el método convencional de distancia, el mismo que fue explicado en la sección 2. Mientras que al momento de obtener un valor de la resistencia de falla diferente de cero mediante la fórmula de Warrington es necesario aplicar la metodología propuesta en este artículo, donde luego de obtener los valores de voltajes y de corrientes medidos por los transformadores de instrumento se calcula la impedancia adaptativa considerando los valores establecidos con anterioridad.

3.2. Resultados

Para el análisis posterior se denomina R_1 al relé conectado a las barras 9-6 y R_2 al equipo de protección conectado en las barras 6-4, tal como lo muestra la Figura 2, su funcionamiento ha sido evaluado para diferentes situaciones de falla, con dos tipos de fuentes, la incorporación de la resistencia de falla y la variación en la potencia generación del parque eólico.

3.2.1. Resistencia de falla

Con el fin de verificar el funcionamiento óptimo del sistema de protección, se realizan pruebas de cortocircuito en las líneas L_1 y L_2 conectadas a un generador síncrono y con resistencia de falla de 0 y 25 Ω . En la Tabla 9 se observa que el ajuste convencional del relé de protección con $Rf=0\Omega$, no presenta errores en el tiempo de actuación. Mientras que cuando la $Rf=25\Omega$, el relé R_1 tiene una operación errónea cuando la falla se localiza a 80 y 90 % de la longitud de la línea. (Tabla 10)

Tabla 10. Operación del relé Siemens 7SA522 en sistemas convencionales considerando resistencia de falla

	R_f	$R_f = 0$		= 25
Localización	Línea 1	Línea 2	Línea 1	Línea 2
de la falla %	R_1	R_2	R_1	R_2
0	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
10	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
20	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
30	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
40	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
50	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
60	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
70	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
80	Zona 2	Zona 1	No ok	Zona 1
90	Zona 2	Zona 2	No ok	Zona 2
100	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2

3.2.2. Potencia de generación eólica fluctuante

En la sección 3 se demuestra que al calcular eventos de cortocircuitos en las líneas de transmisión, que tienen como fuente de alimentación un parque eólico con potencia de generación variable y $R_F=0$, la impedancia vista por la protección se mantiene fija con la variación de potencia.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos al calcular eventos de cortocircuito al tener una $R_F = 25\Omega$, cuando las líneas L_1 y L_2 se ven afectadas por una falla, los ajustes de los relés R_1 y R_2 en los tres escenarios de generación tienen errores de operación siendo la línea L_2 la más afectada como lo muestran la Tabla 11.

Tabla 11. Operación de la protección de distancia ante la generación de potencia fluctuante del parque eólico con $Rf = 25\Omega$

	Potencia máxima operativa			Potencia mínima operativa		encia ninal
Localización de la falla [%]	Línea 1 R_1	Línea 2 R_2	Línea 1 R_1	Línea 2 R_2	Línea 1 R_1	Línea 2 R_2
0	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
10	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
20	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
30	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
40	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
50	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
60	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
70	Zona 1	No ok	No ok	No ok	Zona 1	No ok
80	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok	Zona 1	No ok
90	No ok	No ok	Zona 2	No ok	Zona 2	No ok
100	No ok	No ok	Zona 2	No ok	Zona 2	No ok

La Figura 8 presenta el diagrama distancia-tiempo de la protección de distancia, para el caso del relé R_1 la zona 1 cubre el 80 % de la longitud de la línea, la zona 2 el 136 % y la zona 3 cubre la línea principal y adyacente, si se considera lo expuesto en las secciones anteriores existe un error en el alcance de la zona 2, ya que normalmente cubre solo el 120 % de la longitud de la línea. También el relé R_2 presenta problemas, ahora la zona 2 alcanza solo un 112 % de la protección, lo

que también es erróneo.

Hay que recordar que los tiempos de operación de la protección de distancia fueron detallados en la sección 3 (zonas de protección del relé), aplicando este criterio se ha determinado que el ajuste convencional opera en tiempos erróneos para diferentes puntos de localización de las fallas en las líneas dentro de la Tabla 12 estos valores están resaltados.

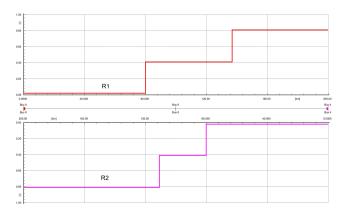


Figura 8. Proyección de las zonas de protección de los relés R_1 y R_2

	Potencia máxima operativa			Potencia mínima operativa		Potencia nominal	
Localización de la falla [%]	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	
0	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
10	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
20	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
30	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
40	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
50	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
60	0.02	9999.99	0.02	9999.99	0.02	9999.99	
70	0.02	9999.99	0.41	9999.99	0.02	9999.99	
80	9999.99	9999.99	0.41	9999.99	0.41	9999.99	
90	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	0.02	9999.99	
100	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	

Tabla 12. Tiempos de operación del relé por ajuste convencional

En la Figura 9 se presenta el plano R-X del relé (R_2) que protege L_2 , luego de un cortocircuito con $R_F=25\Omega$, donde se observa que la impedancia de falla en los tres escenarios evaluados no es identificada por la protección de distancia.

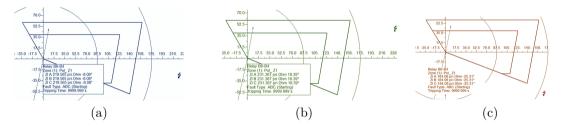


Figura 9. Cortocircuito en L_2 a) Potencia máxima de operación; b) Potencia mínima de operación y c) Potencia nominal

${\bf 3.2.3.} \ \, {\bf M\acute{e}todo} \ \, {\bf de} \ \, {\bf ajuste} \ \, {\bf cuadrilateral} \ \, {\bf adaptativo}$

Anteriormente, se describieron los problemas que presenta la protección de distancia ante un cortocircuito

que contempla la resistencia de falla, para corregir estos errores se aplica la metodología propuesta en este artículo, el método de ajuste cuadrilateral adaptativo, la Tabla 13 muestra los resultados de esta aplicación.

Tabla 13	Aplicación d	lel método d	le ainste	cuadrilateral	adaptativo
Tabla 19.	ADIICACION C	iei metodo c	ie aiuste	Cuaurnaterai	auabtativo

	Potencia máxima operativa			Potencia mínima operativa		Potencia nominal	
Localización de la falla [%]	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	Línea 1 $R_1[s]$	Línea 2 $R_2[s]$	
0	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
10	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
20	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
30	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
40	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
50	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
60	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
70	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
80	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1	
90	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	
100	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	

La Tabla 13 muestra el funcionamiento efectivo de la propuesta metodológica planteada para fallas en las líneas conectadas a un parque eólico.

Las zonas de protección de la metodología propuesta $Z_{*set}^{adap}(*=1,2,3)$, han sido calculadas con la impedancia medida por cada relé luego de un cortocircuito y considerando la resistencia de falla, con el objetivo que el alcance de protección de R_1 y R_2 sea

En la Figura 10 se visualiza el ajuste para el relé R_1 y R_2 , el alcance de protección se obtiene luego de aplicar las ecuaciones (4), (5), y (6), donde el límite máximo de actuación del relé estará dado por la impedancia medida por el equipo luego de una falla. Esta es la diferencia entre el método convencional y la nueva metodología, el ajuste de las zonas de protección ya no toma en cuenta la reactancia propia de la línea, sino que ahora usa valores de la impedancia vista por el relé luego de la falla, lo que hace que las zonas de protección se extiendan y así se corrige la operación indebida del relé.

Al analizar la Tabla 12 se identifica que el relé R_1 que protege a L_1 actúa incorrectamente a partir del 70 % de la longitud de la línea, mientras que el relé R_2 no cumple con la función de protección para la línea L_2 cuando el sistema considera una resistencia de falla. Por esta razón es indispensable aplicar la metodología propuesta, como se muestra en la Figura 11, que al calcular una falla al 0 % de la línea L_2 con a) potencia de generación máxima, b) potencia mínima y c) potencia nominal, la protección actúa en la zona 1 a un tiempo de 0.02 s, a diferencia del ajuste convencional donde la impedancia de falla estaba fuera de zona.

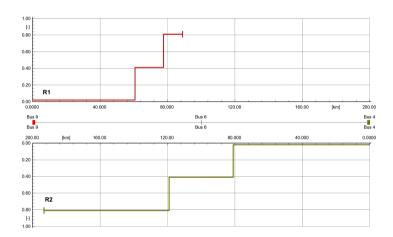


Figura 10. Coordinación de las zonas de protección a potencia máxima del sistema propuesto

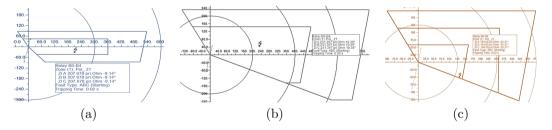


Figura 11. Cortocircuito en L₂, aplicando el método de ajuste cuadrilateral adaptativo con a) Potencia máxima de operación; b) Potencia mínima de operación y c) Potencia nominal

cionamiento del método del ajuste adaptativo prop- precisa y corrigen los tiempos incorrectos de actuación uesto, ahora los relés tanto de la línea L_1 como L_2 del relé convencional. (Tabla 14)

Los resultados de la Tabla 13 muestran el fun- identifican las fallas correctamente con su ubicación

	Potencia máxima operativa			encia operativa	Potencia nominal		
Localización de la falla [%]	Línea 1 [s]	Línea 2 [s]	Línea 1 [s]	Línea 2 [s]	Línea 1 [s]	Línea 2 [s]	
0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
40	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
60	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
70	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
80	0.02	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	
90	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	
100	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	

Tabla 14. Tiempos de operación por ajuste adaptativo ante cortocircuitos de corriente mínima

3.3. Discusión

El comportamiento de la protección de distancia ante la inserción de energías renovables no convencionales cambia cuando existe una resistencia de falla diferente de cero, debido a esto es probable la actuación errónea del relé, por ello la confiabilidad del sistema eléctrico de potencia se vería deteriorado. Para abordar este suceso, el artículo propone una protección con característica cuadrilateral con ajuste adaptativo, en los resultados de la simulación del caso de estudio se observa que, al calcular fallas internas, el método antes mencionado corrige los tiempos de actuación del relé. La metodología propuesta presenta resultados favorables a comparación del método de ajuste tradicional como:

- Las consecuencias al momento de la inserción de una resistencia de falla son consideradas y se eliminan por completo debido a que la zona de protección tiende a ser mayor a la habitual.
- El análisis de comportamiento de las fallas en este artículo es único para un parque eólico, por ello la estructura y la metodología de protección propuestas son aplicables a la inserción de ERNC (parque eólico).
- 3. Las diferentes zonas de protección del esquema propuesto se modifican para adaptarse a la variación de la impedancia adicional. Esta impedancia adicional (Z_{set}) se debe a la resistencia de falla, por lo tanto, la corriente de falla cambia.
- 4. El esquema propuesto está diseñado para un único código de red donde se consideró un valor de resistencia de falla de 25 Ω , que fue calculado mediante la fórmula de Warrington.

- 5. Si comparamos los métodos de ajustes adaptativos para la característica Mho y cuadrilateral se asume que el último tiene más ventajas, ya que, dependiendo de la localización de la falla, la zona se puede expandir solo en el eje R-X o en ambos, es decir, tiene mayor alcance resistivo, pues no dependen el uno del otro. Por ello presenta mayor confiabilidad y seguridad al sistema eléctrico de potencia, a pesar de que esto requiera equipos con mayor tecnología y de mayor costo.
- 6. La metodología aplicada no estima la detección automática de fallas externas de los sistemas, para que esto sea posible se deberá modificar las características internas del relé por medio de programación exclusiva del mismo.

4. Conclusiones

El trabajo emplea un ajuste adaptativo para el sistema New England de 9 barras IEEE modificado, donde se produce la inserción de un parque compuesto por 33 generadores eólicos de 2.5 MW. Las zonas de operación de la característica cuadrilateral adaptativa se ajustan de acuerdo con la falla provocada, con la finalidad de evitar errores en la operación del relé SIEMENS 7SA522. En este trabajo se puede concluir lo siguiente:

El relé de distancia con ajuste cuadrilateral convencional funciona erróneamente cuando se da un cortocircuito trifásico que considere la resistencia de falla. Mientras que, el ajuste cuadrilateral adaptativo identifica correctamente las impedancias de falla desplazadas en eje X por el incremento de la resistencia de falla.

El método adaptativo propuesto muestra una respuesta favorable para diferentes escenarios de cortocircuito, con variación en el punto de falla, la resistencia de la falla y la oscilación de potencia del parque generador, demostrando que el relé opera en la zona de protección correcta.

El método planteado utiliza los datos de voltaje y corriente de los transformadores de instrumentación y calcula la impedancia de la línea hasta el punto de falla, el relé actúa de acuerdo con el ajuste de la protección, si la falla está localizada en el 80 % de la línea la zona 1 opera en t=0 segundos. Mientras que si la falla está en el 20 % de la línea adyacente al relé, opera la zona 2 en t=0.4 segundos. Finalmente, si el evento de cortocircuito se da al 100 % de la línea adyacente de donde está configurado el relé, actúa la zona 3 en t=0.8 segundos.

Referencias

- [1] M. Singh and V. Telukunta, "Adaptive distance relaying scheme to tackle the under reach problem due renewable energy," in 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC), 2014, pp. 1–6. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/NPSC.2014.7103785
- [2] H. Sadeghi, "A novel method for adaptive distance protection of transmission line connected to wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1376–1382, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.072
- [3] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, and S. G. Srivani, "Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 3, no. 4, pp. 365–379, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.00030
- [4] V. K. Gaur and B. R. Bhalja, "A new digital distance relaying scheme for three terminal transmission line," 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1–5, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586152
- [5] Y. Liang, W. Li, and W. Zha, "Adaptive mho characteristic-based distance protection for lines emanating from photovoltaic power plants under unbalanced faults," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 3506–3516, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3015225
- [6] R. Dubey, S. Samantaray, B. Panigrahi, and G. Venkoparao, "Adaptive distance relay setting for parallel transmission network connecting wind farms and UPFC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,

- vol. 65, pp. 113–123, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.033
- [7] Z. He, S. Lin, Y. Deng, X. Li, and Q. Qian, "A rough membership neural network approach for fault classification in transmission lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 429–439, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.027
- [8] B. Kasztenny and D. Finney, "Fundamentals of distance protection," in 2008 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2008, pp. 1–34. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CPRE.2008.4515045
- [9] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power system control and stability. IEEE Press power engineering series, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/43fa38M
- [10] R. A. Espinoza San Martín, Desarrollo de un equivalente reducido del SING para estudios de estabilidad transitoria de primera oscilación. Tesis de grado. Universidad de Chile., 2012. [Online]. Available: https://bit.ly/3MHi8MB
- [11] DigSilent. (2023) Powerfactory application example wind farm base case 2 powerfactory project information. DigSilent. [Online]. Available: https://bit.ly/45JuMDu
- [12] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying*. John Wiley & Sons, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3WMgcHd
- [13] C. Merchán, P. Vintimilla, and P. Astudillo, Análisis en estado estacionario y verificación del sistema de protecciones en las líneas de transmisión de las subestaciones adyacentes ante la incorporación del Parque Eólico Minas de Huascachaca al Sistema Nacional de Transmisión. Tesis de Grado. Universidad de Cuenca., 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/42jpAmH
- [14] J. A. Águila Ríos and J. F. Piña Tapia, Análisis en laboratorio de respuesta de acción en Zona 1 de protección de IEDs de distancia. Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: https://bit.ly/3N5DR1Y
- [15] A. Chamorro, Protecciones de distancia: guía de aplicación. Areva T&D Ibérica, 2005. [Online]. Available: https://bit.ly/42nBA6G
- [16] M. Biswal, B. B. Pati, and A. K. Pradhan, "Adaptive distance relay setting for series compensated line," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 52, pp. 198–206, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.03.018

[17] SIEMENS Distance Protection 7SA 599

integración de energías renovables no convencionales

- [17] SIEMENS, Distance Protection7SA522. SIEMENS AG, 2011. [Online]. Available: https://bit.ly/3C5cCOQ
- [18] COESSINAC, Requisitos mínimos para los sistemas de protección del SEIN. Comité de operación económica del Sistema Interconectado Nacional, 2008. [Online]. Available: https://bit.ly/3N7ORvX
- [19] DigSilent. (2014) Powerfactory 15. DigSilent. [Online]. Available: https://bit.ly/45EQfgK
- [20] E. Muljadi, N. Samaan, V. Gevorgian, J. Li, and S. Pasupulati, "Short circuit current contribution for different wind tur-

- bine generator types," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1–8. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589677
- [21] L. He, C.-C. Liu, A. Pitto, and D. Cirio, "Distance protection of AC grid with HVDCconnected offshore wind generators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 493–501, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2271761
- [22] A. K. Pradhan and G. Joos, "Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 206–213, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889621





IMPACTO DE LA SIMULACIÓN MONTECARLO DE CARGA NO CONTROLADA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Monte Carlo simulation of uncontrolled Electric Vehicle Charging impact on distributed Generation

Carlos W. Villanueva-Machado^{1,*}, Jaime E. Luyo¹, Alberto Ríos-Villacorta²,

Recibido: 08-05-2023, Recibido tras revisión: 31-05-2023, Aceptado: 12-06-2023, Publicado: 01-07-2023

Resumen

La carga no controlada de vehículos eléctricos plantea un gran desafío para los operadores de redes de distribución y los planificadores de sistemas de potencia. En lugar de focalizarse en el control de esta carga no controlada, se propone un modelo que utiliza variables de análisis de contingencias para calcular la capacidad de potencia necesaria en el sistema de potencia. Se emplea la variable de potencia no servida para evaluar la cantidad de potencia de carga no cubierta en cada barra del sistema, seguido del cálculo de la capacidad de potencia adicional requerida, utilizando un sistema fotovoltaico y de almacenamiento y otra alternativa de generación constante en el sistema de potencia IEEE de 14 barras con información sobre algunos vehículos eléctricos y la carga diaria en el sistema de potencia de Perú. Los resultados obtenidos en el sistema de potencia con generación distribuida muestran que no hay presencia de potencia no servida, corroborando el éxito de la metodología utilizada. Este modelo brinda herramientas tanto a los operadores de redes de distribución como a los planificadores de sistemas de potencia, reduciendo el impacto en el sistema de potencia de los vehículos eléctricos y aportando una metodología aplicable a otros sistemas de distribución eléctrica con cargas no controladas.

Palabras clave: fuentes de energía renovable, potencia no servida, sistema de potencia, sistemas de almacenamiento de energía, simulación de Montecarlo, vehículos eléctricos

Abstract

The uncontrolled charging of electric vehicles poses a great challenge for distribution network operators and power system planners. Instead of focusing on controlling this uncontrolled load, a model that uses contingency analysis variables to calculate the power capacity needed in the power system is proposed. The unserved power variable is used to evaluate the amount of uncovered load power at each bus of the system, followed by the calculation of the additional power capacity required using a photovoltaic and storage system and another constant generation alternative in the 14-bus IEEE power system with information on some electric vehicles and daily load in the power system of Peru. The results obtained in the power system with distributed generation, the absence of unserved power, corroborate the success of the methodology used. This model provides tools to both distribution network operators and power system planners, reducing the impact on the power system of electric vehicles and providing a methodology applicable to other electric distribution systems with uncontrolled loads.

Keywords: Electric Vehicles, Energy Storage Systems, Monte Carlo Simulation, Not Served Power, Optimal Power Flow, Renewable Energy Sources, Power System

Forma sugerida de citación: Villanueva-Machado, C. W.; Luyo, J. E. y Ríos-Villacorta, A. "Impacto de la simulación Montecarlo de carga no controlada de vehículos eléctricos en la generación distribuida," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 30, pp. 120-134, 2023. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.10.

¹,*Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

Autor para correspondencia ⊠: cwvillanuevam@uni.pe.

²Facultad de Sistemas Electrónicos e Ingeniería Industrial, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

1. Introducción

Los vehículos eléctricos (EV, electric vehicles en inglés) han ganado popularidad debido a sus bajas emisiones, alta eficiencia y costos operativos más bajos [1]. Sin embargo, el aumento en el número de EV ha significado un reto para las redes eléctricas, principalmente debido a la carga no controlada que estresa las redes de distribución (RD). Este artículo propone un sistema constituido por generación fotovoltaica (PV, photovoltaic en inglés) y almacenamiento de energía en baterías (AE) que puede ser implementado para optimizar el uso de los sistemas PV y de baterías, minimizar el costo de carga de los EV, y reducir la carga sobre la red [1, 2].

Los vehículos eléctricos representan un reto para la capacidad de la red eléctrica, la infraestructura de carga y la tecnología de almacenamiento de energía [3, 4]. El Vehicle-to-Grid (V2G) y la generación distribuida (GD) se han propuesto como tecnologías de respaldo para abordar estos aspectos [1]. Desai, et al. [5] presenta, un modelo del impacto de la adopción local de EV sobre las redes de distribución, lo cual representa un reto para los operadores de estas redes. La simulación Montecarlo (MCS, Monte Carlo simulation en inglés) puede ayudar a los operadores a entender el impacto de sus políticas sobre el desempeño del sistema e identificar los riesgos potenciales de ciertas decisiones [6] como una manera de abordar estos aspectos.

De acuerdo con el estudio de Kumar, et al. [7], la MCS es una herramienta valiosa para evaluar el impacto de factores de incertidumbre sobre el desempeño de los sistemas de potencia (SP). La condición de operación de la red de distribución de electricidad puede mejorarse usando MCS. La presencia de la variable potencia no servida (PNS) muestra condiciones de operación de déficit de potencia o sobrecarga para el SP.

Se han propuesto las tecnologías de generación fotovoltaica y de almacenamiento de energía como soluciones potenciales para integrar los EV a la red eléctrica, como se sugiere en [1], [6], al igual que la optimización de la PNS como un método para monitorear el desempeño del SP. Este método cubre los costes operacionales durante contingencias, ya que la PNS se expulsará de la carga [8]. La tecnología V2G también es una solución para los retos de la carga no controlada de EV, porque puede ayudar a mitigar los aspectos negativos y a mejorar la sostenibilidad [9]. Se ha sugerido la MCS como una potente herramienta para analizar el impacto del suministro del excedente de carga requerido por los EV utilizando GD.

De igual forma, la descripción de análisis complementario examina la interacción con el uso de EV. Wang, et al. [2] describe, la interacción entre la intermitencia producida por los generadores renovables y

la capacidad de almacenamiento que se obtiene utilizando el proceso de carga V2G. Ahmadian, et al. [4] considera, una metodología estocástica asociada con el proceso de carga inteligente de EV, centrada en un análisis de la degradación de la batería. Por otra parte, Mahmud, et al. [3] se enfocan en la interacción entre las diferentes variables que se requieren para un proceso de carga inteligente. El entorno del Internet de la energía se ha adaptado de acuerdo con los futuros requerimientos de operación de una red inteligente.

Como proponen Lazarou, et al. [10], la GD puede ayudar a mitigar los impactos negativos de la carga no controlada de EV y mejorar la sostenibilidad. La GD puede suministrar energía a la red durante las horas pico para balancear la carga, reduciendo el impacto de la carga no controlada de EV sobre la red eléctrica. Es importante anticipar las deficiencias de energía para determinar las políticas energéticas apropiadas, [5] propone un modelo para caracterizar los patrones geográficos y de recorrido de los propietarios de EV para proporcionar información acerca de la conducta de viaje y demanda de energía.

El estudio propuso el uso de MCS para analizar los efectos de la carga no controlada de EV a mediano plazo. Esto contribuye a establecer políticas energéticas para satisfacer la demanda de energía de los propietarios de EV. La implementación de estas medidas mejoró la estabilidad y confiabilidad de las redes eléctricas distribuidas.

Este método proporciona un panorama de los escenarios potenciales con base en las tendencias globales y el mercado de transporte con EV en Perú, lo que resulta importante para optimizar las redes eléctricas distribuidas, utilizando modelado algebraico. El estudio apunta a asistir en el desarrollo de políticas para satisfacer la demanda energética, mientras garantiza condiciones de estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica distribuida, [6] destaca la necesidad de estaciones de carga y de estrategias de GD debido a los requerimientos de carga de los EV.

2. Materiales y métodos

Se analizarán diferentes niveles de adopción de vehículos eléctricos para evaluar el impacto en la energía requerida de RD, utilizando información mundial y peruana. La proyección revisa la estratificación del parque vehicular actual e histórico del Perú.

La metodología presentada en el artículo involucra un bucle que se inicia con la información del modelo de EV y llega hasta la etapa de ahorro de data, como se ilustra en la Figura 1. Este lazo se aplica a todos los modelos de EV y los tres escenarios de adopción de EVs mencionados en la sección "2.3 Múltiples Escenarios".

Luego, la data resultante se procesa a través de dos procesos separados. El primer proceso es la MCS, para reducir la cantidad de data. El segundo proceso es el análisis de la RD, explicado en la sección 2.6. La información recolectada en estos procesos se utiliza para comparar y evaluar el sistema diseñado que integra

la generación PV y el AE para abordar el excedente de demanda de energía sobre la RD causado por la carga no controlada de EVs. La Tabla 1 muestra la terminología empleada en este artículo.

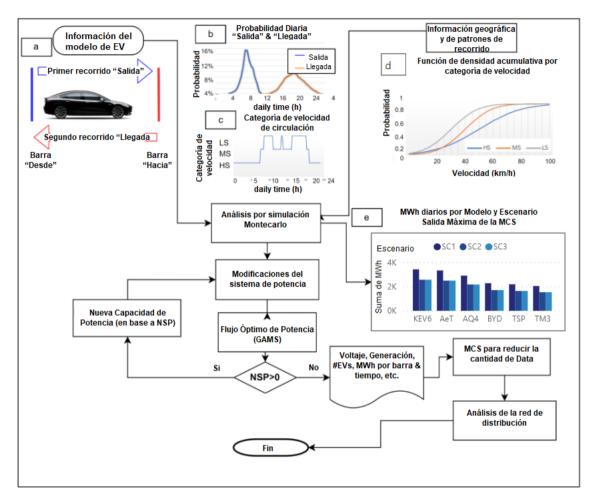


Figura 1. Metodología y data de entrada: (a) Entradas a la simulación Montecarlo acerca de modelos de vehículos eléctricos, y explicaciones de recorridos diarios. (b) Función de densidad de probabilidad (PDF) de las horas de los recorridos diarios. (c) Categoría de la velocidad de circulación diaria. (d) Función de densidad acumulativa del valor de velocidad por categoría de velocidad de circulación. (e) Resultados de la simulación Montecarlo, entrada para los próximos pasos.

 ${\bf Tabla~1.}$ Terminología utilizada en este artículo

Terminología	Descripción
PS	Sistema de potencia
MCS	Simulación Montecarlo
V2G	Vehicle-to-Grid
GAMS	General Algebraic Modeling System
PNS	Potencia no servida
EVs	Vehículos eléctricos
CP	Capacidad de potencia
GD	Generación distribuida
RD	Red de distribución
PV	Fotovoltaico
AE	Almacenamiento de energía
FOP	Flujo óptico de potencia
ENS	Energía no servida

2.1. Descripción de proyección de carga descontrolada en Perú

Las importaciones peruanas de vehículos eléctricos han ido en aumento (según lo informado por el Departamento de Estudios Económicos de la AAP, 2019) desde 2016. Hasta agosto de 2019, se importaron 253 vehículos híbridos y 16 eléctricos. La cantidad global de vehículos eléctricos importados anualmente fue de 11 en 2016, 93 en 2017 y 165 en 2018. En total, se informaron 535 EV hasta agosto de 2019. El Gobierno peruano informó la cantidad de vehículos en circulación hasta 2018 de cada categoría: automóviles, SUV y camionetas.

2.2. Proceso de proyección de carga descontrolada en Perú

Se proyecta las tasas de adopción de vehículos eléctricos (EV) optimistas, pesimistas y habituales en Perú. Se estima la tasa de carga controlable, utilizando la participación en el mercado como punto de referencia y calcula la tasa de carga no controlable. La tasa de carga no controlable se calcula como un complemento de la tasa de carga controlable, que se supone que varía anualmente según las tendencias regionales y globales de adopción de vehículos eléctricos.

Los supuestos para las proyecciones pesimista y optimista se basan en las tendencias actuales. Es posible que no se mantengan en el futuro. Se espera que las ventas de vehículos eléctricos continúen aumentando debido a los incentivos gubernamentales, la reducción de los costos de las baterías y una mayor concienciación de los consumidores.

2.3. Escenarios múltiples

Este estudio examina el impacto potencial del uso de EVs sobre la demanda de energía en el SP de Perú. Se presentan tres escenarios de crecimiento en su uso: bajo (15 % por año), medio (25 % por año) y alto (40 % por año). Tres escenarios de 2000, 2500 y 3750 EVs estiman el número de cargas no controladas en el mediano plazo. Los escenarios fueron establecidos utilizando datas de Perú y mundiales [11].

Sobre la base de los escenarios, los autores evaluaron el impacto potencial del uso de EV sobre el SP de Perú, bajo diferentes condiciones. Los criterios de selección para los escenarios estuvieron basados en tasas de crecimiento realistas y variadas, análisis del peor caso, y data histórica y actual. También se hace una revisión de la estratificación actual e histórica de la flota vehicular de Perú.

Hasta agosto de 2019 se importaron a Perú 253 vehículos híbridos y 16 EV. El Gobierno peruano reportó el número de vehículos de cada categoría que circularon hasta 2018 [12]. La información se encuentra detallada en la sección 2.2.

2.4. Análisis por simulación Montecarlo

La Figura 1a muestra cómo los EV salen de y llegan a diferentes barras, con horas de salida y llegada según los patrones geográficos y de recorrido de los propietarios de los EVs [5]. El modelo utiliza muestras Ns (s), T períodos de tiempo (t) y NV EVs (v), caracterizados por medio de variables estocásticas [13].

La Figura 1b muestra las variables estocásticas [9] $dep_{v,s}$ y $arr_{v,s}$ a las que se le ajustan distribuciones de probabilidad [2], con variables binarias que representan los estados ($dep_{t,v,s}$ y $arr_{t,v,s}$). Las Figuras 1c y 1d muestran las caracterizaciones probabilísticas

de la variable velocidad del EV $(sv_{t,v,s})$ y la distancia entre barras corregida usando $tdcf_{v,s}$ y longitud $L(Fr_{v,s}:To_{v,s})$.

$$td_{v,s} = L(Fr_{v,s}; To_{v,s}) \times tdcf_{v,s} \tag{1}$$

La ecuación (1) combina los parámetros estocásticos $Fr_{v,s}$ y $To_{v,s}$ del estado de la ubicación del EV con $tdcf_{v,s}$, para determinar la distancia final recorrida $td_{v,s}$. Para el análisis MCS se requiere data específica del EV, como capacidad de la batería (BCES), consumo específico durante la conducción $(SC_{v,s})$, estado de carga $(SoC_{min} \ y \ SoC_{max})$, máxima potencia de carga (Pv_{max}) , eficiencia de carga y descarga $(n_{chg} \ y \ n_{dsg})$, valor de consumo en circulación $(R_{t,v,s})$, e índice de variable binaria $(X_{t,v,s})$.

2.4.1. Pseudocódigo – modelado del recorrido

- 1. Definir la hora de salida, hora de llegada, y las variables distancia temporal recorrida en circulación $t = dep_{v,s}$ y la distancia recorrida en circulación, $rdt_{v,s} = 0$ para el caso de salida, y $t = arr_{v,s}$ y $rdt_{v,s} = 0$ para el caso de llegada.
- 2. Iniciar el bucle para llenar la distancia recorrida en circulación hasta sobrepasar la distancia recorrida, como se indica en las ecuaciones (2) y (3).

while
$$rdt_{v,s} \le td_{v,s} \{$$
 (2)

$$rdt_{v,s} = +sv_{v,s} \times 24/T \tag{3}$$

3. Condicional para verificar si se alcanza la última etapa del recorrido de salida, como en las ecuaciones (4) y (5).

$$if \ rdt_{v,s} \le td_{v,s} \{ \tag{4}$$

$$R_{t,v,s} = sv_{v,s} \times SC_{v,s}/n_{dsg} \times 24/T \tag{5}$$

4. Asignar un valor al consumo en circulación para etapas diferentes a la última en el recorrido de salida, como en la ecuación (6).

$$else\{R_{t,v,s} = (sv_{v,s} + td_{v,s} - rdt_{v,s}) \times SC_{v,s}/n_{dsg}\}$$
 (6)

5. Finalizar el bucle asignando el valor de hora de finalización de la salida u hora de inicio de la llegada, y estado binario en circulación, tal como se muestra en la ecuación (7) para uno de salida y en la ecuación (8) para un recorrido de llegada.

$$X_{t,v,s} = 1 \land t = +1 \} de_{v,s} = t$$
 (7)

$$X_{t,v,s} = 1 \land t = -1 \} ai_{v,s} = t$$
 (8)

Las variables tales como $de_{v,s}$ y $ai_{v,s}$ marcan el fin del recorrido de salida y la hora a la que el EV está listo para iniciar el recorrido de retorno, respectivamente.

La variable binaria $CS_{b,t,v,s}$ hace un seguimiento del estado de la barra de carga para el EV ubicado en la barra b. Las ecuaciones (9) y (10) fuerzan el cumplimiento de restricciones asociadas al estado de la barra de carga.

$$CS_{Fr_{v,s},t,v,s} = 1 \forall arr_{v,s} < t < dep_{v,s}$$
 (9)

$$CS_{To_{v,s},t,v,s} = 1 \forall de_{v,s} < t < ai_{v,s} \tag{10}$$

Las variables $ChR_{v,s}$ y CC se definen como la energía total requerida por el EV en circulación y la carga completa, respectivamente. Estas variables se calculan en las ecuaciones (11) y (12).

$$ChR_{v,s} = \sum_{t} R_{t,v,s} \tag{11}$$

$$CC = Pv_{max} \times 24/T \times n_{chq}$$
 (12)

2.4.2. Pseudo código – modelado de la carga no controlada

1. Colocar 0 el valor de $tch_{v,s}$, como en la ecuación (13).

$$tch_{v,s} = 0; \forall v \in NV \land s \in Ns$$
 (13)

2. Establecer el tiempo de carga: salida y llegada, como en la ecuación (14).

$$t = de_{v,s} \wedge t = arr_{v,s} + 1 \tag{14}$$

3. Aumentar y asignar el valor de la carga no controlada del vehículo $UC_{b,t,v,s}$, de acuerdo con la carga temporal $tch_{v,s}$, midiendo la carga no controlada en la barra correspondiente, sin alcanzar la energía requerida, como en las ecuaciones (15) y (16).

$$tch_{v,s} = +CC (15)$$

if
$$tch_{v,s} \leq ChR_{v,s}\{UC_{b,t,v,s} = CS_{b,t,v,s} \times CC\}$$
 (16)

4. Asignar carga no controlada al tiempo mientras se llega a la energía requerida, como en la ecuación (17).

$$else\{UC_{b,t,v,s} = (ChR_{v,s} + CC - tch_{v,s}) \times CS_{b,t,v,s}\}$$
(17)

5. Finalizar el bucle como en la ecuación (18).

$$t = +1\} \tag{18}$$

La ecuación (19) se utiliza para obtener la información de la carga pico requerida, PLR_s , que se reporta como la salida final de la MCS. La carga en la barra b del SP se representa como $Pdps_{b,t}$. La Figura 1e muestra un resumen de esta información, con el acumulado diario de la energía requerida por la RD para todos los modelos y escenarios. La Figura 1e compara las salidas máximas de la MCS que producen más carga sobre la RD durante las horas pico. Por otra parte, las salidas mínimas de la MCS representan el mínimo impacto en el estado de carga en la hora pico.

$$PLR_{s} = max\left(t, \sum_{b} \left(\sum_{v} UC_{b.t.v.s} + Pdps_{b,t}\right)\right)$$
(19)

2.5. Interacción entre la MCS y el flujo óptimo de potencia

Las ecuaciones (21) y (22) muestran cómo se eligen las salidas de la MCS. El excedente de carga se agrega a la carga del SP y se denota como $Pd_{b,t,s}$. La información obtenida del análisis con la MCS (ecuaciones (21) y (22)) es una entrada importante para optimizar la operación de la red eléctrica de distribución, específicamente de la subsección de transmisión, utilizando el modelado algebraico.

$$[PLR_{smax}, smax] = max(s, PLR_s) \tag{20}$$

$$[PLR_{smin}, smin] = min(s, PLR_s)$$
 (21)

$$Pd_{b,t,s} = Pdps_{b,t,s} + \sum UC_{b,t,v,s}$$
 (22)

2.6. Flujo óptimo de potencia

El FOP eléctrica se modela en el software GAMS, utilizando la minimización de la función objetivo (fo) CONOPT de la ecuación (24) para cada uno de los seis casos (tres escenarios, dos salidas de la MCS). Este proceso suministra la cantidad de PNS requerida en cada barra de la RD para cada período analizado, como se muestra en la ecuación (25). Los enfoques de optimización GAMS y el análisis complementario con la MCS tendrían la capacidad de superar los retos de integrar EVs y GD en los SP [14].

2.6.1. Función objetivo

La salida principal es la energía asignada a la energía no servida (ENS) diaria, con información reportada cada media hora. Esto involucra evaluar ecuaciones para todo $t \in T \land s \in \{s_{min}, s_{max}\}$. La ENS se utiliza para asignar la cantidad de PNS durante este período de tiempo, según la ecuación (23).

La PNS se utiliza como variable auxiliar para identificar áreas y la cantidad de energía requerida para cubrir el excedente debido a la carga de EVs, y también puede representar la cantidad de potencia requerida como excedente de generación en su barra para evitar fallas del SP [8].

La función objetivo (of) para optimizar las pérdidas de energía asociadas a la operación de la red se expresa en la ecuación (24), donde también se evalúa la generación de potencia en la barra auxiliar Pg_{slack} . Según se menciona en [15], el precio de penalización por ENS en Perú es $C_{pen} = \$6000$. El uso de la PNS como fuente de datos puede ayudar a los planificadores a comparar las fuentes alternativas de generación, ajustar la energía requerida en el modelado especio-tiempo, y dimensionar las condiciones de GD en el SP.

$$NSE_k = 24/T \times NSP_k \tag{23}$$

$$of = \sum (C_{pen}NSE_k) + Pg_{slack}$$
 (24)

2.6.2. Restricciones para el flujo óptimo de potencia

Las restricciones para el FOP son el balance de potencia activa y reactiva. Las ecuaciones (25) y (26) definen el balance de potencia, donde Pg_k y NsP_k denotan la potencia de generación y las reservas no rotativas, mientras que Pd_k representa la potencia requerida por la carga.

$$Pg_k + NSp_k = Pd_k + \sum P_{km} \tag{25}$$

$$Qg_k = Qd_k + Qsh_k + \sum Q_{km} \tag{26}$$

Las variables Qg_k , Qd_k están relacionadas con la potencia reactiva de generación y carga en cada barra. Las ecuaciones (27) y (28) calculan la potencia activa y reactiva por línea (P_{km} y Q_{km}) y la potencia aparente S_{km} en la ecuación (29) controla la sobrecarga en la línea de potencia correspondiente.

$$P_{km} = V_k V_m Y_{km} cos(th_{km} + d_{km}) - V_k^2 cos(t_{km})$$
 (27)

$$Q_{km} = -V_k V_m Y_{km} sin(th_{km} + d_{km}) + V_k^2 sin(t_{km})$$
(28)

$$S_{km} = \sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2} \le S_{kmupper} \tag{29}$$

Las variables V_i , d_i , Qg_i , Pg_i tienen límites inferior y superior, denotados por x_{lower} y x_{upper} en la ecuación (30). La sección se refiere a [8] para los detalles sobre los parámetros de voltaje $(V \ y \ d)$ y los parámetros de la matriz de admitancia $(Y \ y \ t)$.

$$x_{lower} \le x \le x_{upper}$$
 (30)

2.7. Capacidad del nuevo sistema de potencia para garantizar operación normal

Se consideraron dos opciones para el modelo desarrollado para determinar el momento y la barra de falla. La primera opción involucra un incremento lineal de la capacidad de potencia (CP) en una barra específica. La segunda opción es una combinación de generación PV y un sistema de AE.

La ecuación (31) describe la primera opción, la cual modela la nueva CP $(PNg_{k,t})$ para operar durante el día y recuperar los costos de inversión. La segunda opción apunta a minimizar la función objetivo de costos adicionales, con costos agregados x_{cost} de acuerdo con la PNS calculada $(NSPc_{k,t})$.

$$PNg_{k,t} = Pg_{k,t} + NSPc_{k,t} \tag{31}$$

Las ecuaciones (32), (33) y (34) describen el proceso de la segunda opción, la cual cubre la nueva CP requerida, incluyendo la dimensión de la potencia $(PhPC_b)$ y el almacenamiento de energía $(SSEC_b)$, y se ajusta según la variación de la disponibilidad solar (Saf_t) y del estado de carga $(SoCv_{k,t})$ para redistribuir la energía almacenada cada media hora (Dt). La fuente de la capacidad de generación excedente no se analiza debido a su variedad.

$$fo = PhPC_{cost} \times PhPC_k + SSEC_{cost} \times SSEC_k$$
 (32)

$$PhPC_k \times Saf_t \ge NSPc_{k,t} + SoCv_{k,t}$$
 (33)

$$SoC_{k,t} = SoC_{k,t-1} + SoCv_{k,t-1} \times Dt \tag{34}$$

2.8. Impacto sobre la red de distribución

Los estudios indican que los vehículos eléctricos tienen un impacto sobre las redes de distribución. Los requerimientos diarios de energía son independientes del modelo de EV. La data de voltaje y la energía requerida por los EV se recopila y se procesa mediante ciencia de datos, obteniendo información estadística utilizando MCS. La carga de los EV puede causar caídas de voltaje e inestabilidad en la red, lo cual puede ser abordado usando sistemas de almacenamiento de energía y estrategias inteligentes de carga [2], [5].

2.9. Caso de estudio

2.9.1. Carga no controlada de vehículos eléctricos (datos proyectados 2023–2031)

Las suposiciones y las fuentes de información utilizan la participación de mercado como un punto de referencia para las tasas regionales y globales de carga controlada. Las ventas acumuladas de EV se consideran como el total de EV en circulación, y se espera que las ventas de los mismos continúen incrementándose debido a incentivos gubernamentales, costos reducidos de baterías y aumento en la conciencia del consumidor.

La provección optimista supone un aumento anual

de 25 % en las ventas de EV, y supone que la tasa de carga controlada es 70 %. La proyección pesimista supone un aumento anual de 10 % en las ventas de EV, y supone que la tasa de carga controlada es 50 %. Estas suposiciones se utilizaron para proyectar la adopción de EV en Perú.

La Tabla 2 presenta los rangos de la proyección de la adopción de EV en Perú entre 2023 y 2031. Esto incluye las ventas acumuladas, las tasas de carga controlada y no controlada, y el número de EV en circulación. La data se presenta en los escenarios optimista, pesimista y normal.

Tabla 2. Carga no controlada de vehículos eléctricos (data proyectada 2023–2031)

Año	Total de vehículos N.°	Ventas acumuladas de EV N.° EV	Participación de mercado %	Tasa de carga no controlada %	Carga no controlada de EV N.° EV
2023	366 900-372 700	2 450-2 930	6.67-7.85	85.30-86.70	2 120-2 490
2024	375 800-385 900	$3\ 180\text{-}4\ 170$	8.45 - 10.81	84.30 - 85.80	2719-3460
2025	384 000-399 800	$4\ 200-5\ 750$	10.94-14.39	83.30-84.90	$3\ 606\text{-}4\ 880$
2026	392 300-414 500	$5\ 480-7\ 770$	13.97 - 18.74	82.30-84.00	4760-7070
2027	400 800-430 000	7 190-10 350	17.95 - 24.07	81.30-83.10	$6\ 455 - 9\ 060$
2028	409 400-446 400	9 370-13 500	22.84-30.21	80.30-82.20	8 485-11 978
2029	418 200-463 700	12 030-17 350	28.73 - 37.40	79.30-81.30	10 963-16 652
2030	427 100-482 100	15 220-22 020	35.63 - 45.65	78.30-80.40	$14\ 372\text{-}17\ 494$
2031	436 100-501 600	$18\ 920\text{-}27\ 650$	43.31 - 55.31	77.30-79.50	$15\ 390\text{-}24\ 768$

2.9.2. Múltiples escenarios

El artículo presenta tres escenarios para el crecimiento de la venta de EV en Perú: optimista, normal y pesimista, con estimaciones de tasas de carga controladas para cada escenario. Basándose en esta información y al análisis de la carga no controlada de los EV, el estudio proyecta que el número de EV circulando en Perú para 2023 variará entre 2450 y 2940. El artículo

también compara las características técnicas de diferentes modelos de EV y sus efectos sobre la RD, como se muestra en la Tabla 3; se encontró que el KIA EV6 es el vehículo que requiere más energía entre los EV estudiados. Sin embargo, los escenarios presentados se basan en suposiciones generales, y puede que no reflejen de manera precisa las condiciones específicas del mercado peruano. Ver la Tabla 2 para mayor información.

Tabla 3. Modelos de vehículos eléctricos (data del 2021)

\mathbf{EV}	BCES kWh	${ m SCv,smin} \ { m kWh/km}$	SCv,smax kWh/km	Pvmax kW	SoCmin %	SoCmax %
TSP	100	0.18	0.21	250	5	80
AQ4	82	0.181	0.181	125	15	95
KEV6	77.4	0.21	0.227	228	10	80
BHEV	76.9	0.164	0.207	360	30	80

2.9.3. Análisis por simulación Montecarlo

El estudio analizó tres escenarios con microescenarios estocásticos. El escenario 1 consistió en 2000 EV con 200 muestras. El escenario 2 tuvo 2500 EV con 120 muestras. El escenario 3 tuvo 3750 EV con 80 muestras. El análisis incluyó $1.0 \times 10^{+6}$ escenarios microestocásticos con incertidumbre. En la sección 2.2 se ajustó una distribución normal a las variables $dep_{v,s}$ y $arr_{v,s}$. La Figura 1b ilustra las diferencias significativas entre las funciones de distribución de probabilidad de las horas de salida y llegada. Las horas de llegada tienen una desviación estándar que engloba horas después del trabajo cuando los individuos pueden atender tareas del hogar o socializar, lo cual no ocurre durante las horas de la mañana antes del trabajo.

De acuerdo con [13], el Tesla Model 3 tiene una BCES de $2.88 \times 10^{+8}$ J (80 kWh). El consumo específico de energía para este vehículo está dentro del rango de $SC_{v,s} \in <684;900 > J/m(<0.19;0.25 > KWh/Km)$. La máxima potencia de carga del EV

es aproximadamente $Pv_{max}=1.5\times 10^{+5}~W$ with $n_{chg}=90~\%$ y $n_{dsg}=90~\%$. Para modelar las baterías del EV, se establece el estado de carga mínimo SoC_{min} en 15 % de la capacidad de la batería, mientras que el estado de carga máximo SoC_{max} se establece en 95 % de la capacidad de la batería.

2.9.4. Interacción entre la MCS y el FOP

La caracterización de la incertidumbre del recorrido y geográfica involucra categorizar el número de EV por barra como "desde" o "hacia" según el recorrido de salida. La Figura 2 muestra diagramas de caja de la energía total requerida por la RD en cada hora, comparando el KIA EV6, que requiere la mayor cantidad de energía, con el Tesla Model 3, que requiere la menor cantidad de energía (como se muestra en la Figura 1e). Los valores reportados en la Figura 2 muestran que el KIA EV6 es el modelo que consume más energía, provocando un mayor requerimiento de energía para la RD.

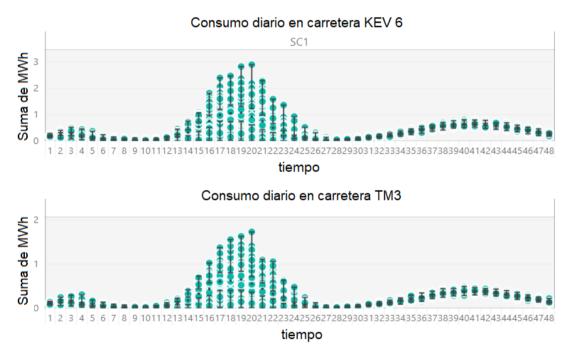


Figura 2. Consumo diario en circulación requerido por escenario y hora

2.9.5. Uso del flujo óptimo de potencia

El sistema de potencia IEEE de 14 barras [16] representa el SP de la clase socioeconómica A en Perú, con variaciones en la longitud de la línea de potencia. La data de carga del mercado eléctrico de febrero de 2020 se utiliza como el factor de carga diario. Los efectos de las categorías de circulación de alta, media y baja velocidad se reportan en [13]. Google Maps suministró data histórica de tráfico para las tres categorías re-

presentadas por distribuciones normales. La primera categoría es velocidad alta con un valor promedio de $13.89~\mathrm{m/s}$ ($50~\mathrm{km/h}$) y una desviación estándar de $5.56~\mathrm{m/s}$ ($20~\mathrm{km/h}$). La segunda categoría es velocidad media, con un valor promedio de $9.72~\mathrm{m/s}$ ($35~\mathrm{km/h}$) y una desviación estándar de $4.17~\mathrm{m/s}$ ($15~\mathrm{km/h}$). La tercera categoría es velocidad baja, con un valor promedio de $5.56~\mathrm{m/s}$ ($20~\mathrm{km/h}$) y una desviación estándar de $2.78~\mathrm{m/s}$ ($10~\mathrm{km/h}$).

2.9.6. Capacidad del nuevo sistema de potencia para garantizar operación normal

La opción del primer CP excedente no necesita data adicional, pero la opción del sistema con generación PV y almacenamiento de energía requiere un factor de disponibilidad solar, obtenido de [17] con data de costos de [18]. La subsección 2.5 presenta las restricciones y la función de la interacción de potencia con PNS. Las restricciones (32) a (34) son complementadas por la ecuación (35), manteniendo la variable $SoC_{k,t}$ entre los límites de 0 y la capacidad del sistema de almacenamiento, $SSEC_k$.

$$0 \le SoC_{k,t} \le SSEC_k \tag{35}$$

Las variables de la función objetivo en la ecuación (33) incluyen un $PhPC_{cost}$ de 1.30 \$/W para el costo de CP fotovoltaica y un $SSEC_{cost}$ de 1.11×10^{-4} \$/J (400 \$/kWh) para la capacidad del sistema de almacenamiento de energía.

2.9.7. Análisis de la red de distribución

Finalmente, se obtienen dos síntesis muy similares a la data global. La primera representó el 4~% de los

casos, y la otra correspondió al 10 % de los casos. Estas reducciones son evaluadas en una red de distribución comúnmente utilizada (el sistema IEEE de 14 barras) mediante la herramienta Simulink del software MAT-LAB. El efecto de todas las simulaciones realizadas en la RD se reporta en la siguiente sección.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis por simulación Montecarlo

La Figura 3 muestra el número de EV en el SP y dos figuras para cada escenario, ilustrando los patrones geográfico y de recorrido de los EV. La Tabla 4 proporciona información adicional sobre el número de EV saliendo de y llegando a cada barra en su primer recorrido, junto con la incertidumbre de los patrones geográficos. Los encabezados en la Tabla 4 están clasificados como "Min MCS" y "Max MCS", representando los escenarios mínimos y máximos de carga pico diaria reportados en las salidas de la MCS. Estos clasificadores pueden ayudar a evaluar los potenciales impactos de los EV sobre el SP.

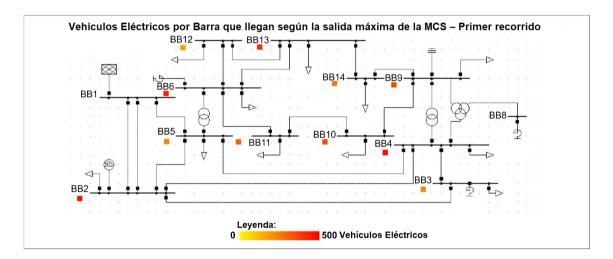


Figura 3. Número de vehículos eléctricos que llegan según la salida máxima de la simulación Montecarlo - escenario 1

Tabla 4. Número de v	vehículos eléctricos	desde y l	hacia cada	barra po	or escenario	según la	s salidas o	de la s	simulación
Montecarlo									

Escenario 1					Escenario 2				Escenario 3			
EVs	Vs Min MCS Max MCS		MCS	Min	MCS	Max	MCS	Min	MCS	Max MCS		
\mathbf{Bus}	\mathbf{Desde}	Hacia	\mathbf{Desde}	Hacia	\mathbf{Desde}	Hacia	\mathbf{Desde}	Hacia	\mathbf{Desde}	Hacia	\mathbf{Desde}	Hacia
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	180	242	171	269	227	265	224	288	325	460	307	424
3	186	132	197	117	208	151	240	149	337	219	333	227
4	179	255	177	256	215	296	223	336	360	454	342	502
5	204	120	200	103	214	152	227	141	328	217	380	209
6	186	225	188	222	208	339	232	286	320	463	352	440
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	191	179	166	188	229	256	224	264	358	341	360	342
10	172	196	204	157	244	227	257	242	340	353	322	344
11	172	131	153	164	240	183	232	197	343	287	329	274
12	188	132	201	119	234	150	234	147	357	202	341	221
13	170	244	167	260	249	290	196	280	324	467	337	468
14	172	144	176	145	232	191	211	170	358	287	347	299

3.2. Interacción entre la MCS y el FOP

La Figura 4 compara la aplicación para el Tesla Model 3, que tiene el consumo específico más bajo. La primera aplicación es el PS_{MCS} , que se muestra en la sección derecha. Los valores también están relacionados con la salida máxima de la MCS. Mientras tanto, la Tabla 5 presenta las características promedio de carga diaria para diferentes escenarios con salidas mínimas y máximas de la MCS.

La energía de la carga Ed_s se calcula mediante la ecuación (36). La carga pico $Pd_{max,s}$ representa la carga máxima diaria suministrada por el SP para cada escenario analizado, como se expresa en la ecuación (37).

Finalmente, el factor de carga LF_s se determina dividiendo la potencia promedio de la carga por la potencia máxima de la carga, como se muestra en la ecuación (38).

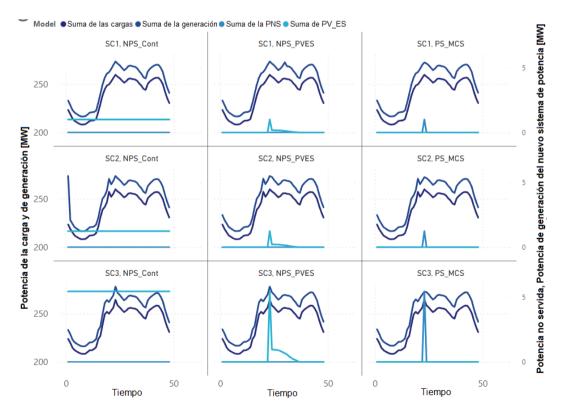


Figura 4. Comparación del desempeño del sistema de potencia: flujo óptimo de potencia (PS_MCS), fotovoltaico y almacenamiento de energía (NPS_PVES) y generación continua (NPS_Cont)

	$\begin{array}{c} \mathbf{BAU} \\ \mathbf{sin} \\ \mathbf{EV} \end{array}$	Escen	Escenario 1 Esc		ario 2	Escena	ario 3	
Carga diaria	2.	Min MCS	$\begin{array}{c} \mathbf{Max} \\ \mathbf{MCS} \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathbf{Min} \\ \mathbf{MCS} \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathbf{Max} \\ \mathbf{MCS} \end{array}$	$egin{array}{l} ext{Min} \ ext{MCS} \end{array}$	Max MCS	
$Ed_s $ (MWh)	5,704.6	5710.58	5724.82	5711.51	5729.43	5715.56	5742.4	
$Pd_{max,s}$ (MW)	257.2	257.25	259.66	257.31	259.91	257.51	264.23	
LF_s	0.906	0.906	0.907	0.905	0.906	0.910	0.906	
Eg_s (MWh)	5,979.1	5985.82	6000.95	5986.67	6005.91	5991.1	6017.9	
Los_s (MWh)	274.5	275.24	276.12	275.17	276.48	275.54	275.5	
NSE (MWh)			0.5		0.62		2.74	
Max NSP (MW)			1.01		1.25		5.47	
NSP bus			14		14		14	

Tabla 5. Data de carga por escenario para el vehículo eléctrico Tesla (2018) y desempeño del flujo óptimo de potencia para todos los escenarios

$$Ed_s = \sum \sum Pd_{b,t,s} \times 24/T; s = \{s_{min}, s_{max}\}$$
 (36)

$$Pd_{max,s} = max\left(\sum Pd_{b,t,s}\right); s = \{s_{min}, s_{max}\}$$
(37)

$$LF_{s} = \frac{\sum \frac{\sum Pd_{p,t,s}}{T}}{Pd_{max,s}}; s = \{s_{min}, s_{max}\}$$
 (38)

Se observa un incremento en la diferencia en la carga pico entre las salidas máximas y mínimas de la MCS, lo cual indica el efecto estocástico del análisis. Para el escenario 1, la brecha entre las salidas de la MCS es $2.41 \times 10^{+6}$ W. Para el escenario 2, la diferencia entre las salidas de la MCS es $2.60 \times 10^{+6}$ W. Para el escenario 3, la brecha entre las salidas de la MCS es $6.72 \times 10^{+6}$ W. A continuación, se reporta la diferencia en la energía diaria de la carga entre las salidas máximas y mínimas de la MCS para cada escenario. El escenario 1 tiene una diferencia en la energía diaria de $5.13 \times 10^{+10} J$ (14.24 MWh). El escenario 2 tiene una diferencia en la energía diaria de $6.45 \times 10^{+10} J$ (17.92 MWh). El escenario 3 tiene una diferencia en la energía diaria de $9.66 \times 10^{+10} \ J$ (26.84 MWh). El incremento en la brecha se debe al número de EV en los escenarios evaluados.

3.3. Uso del flujo óptimo de potencia

Comúnmente, el modelo emplea el FOP para evaluar el desempeño del SP para los diferentes escenarios de

carga de EV. La Figura 4 muestra el desempeño de la CP y la PNS requerida para mantener la operación normal, donde se especifica la salida más alta de la MCS para el EV Tesla 3 Model. La Tabla 5 resume los hallazgos del flujo óptimo de potencia, incluyendo variables tales como Eg_s y $Loss_s$, que representan energía generada, brechas de energía y NSE_s asignando PNS a todas las barras durante el día. Las ecuaciones (39) a (41) definen estas variables.

$$Eg_s = \frac{\sum \sum Pg_{b,t,s} \times 24}{T}; s = \{s_{min}, s_{max}\}$$
 (39)

$$Loss_S = Eg_s - Ed_s; s \in \{s_{min}, s_{max}\}$$
 (40)

$$NSE_s = \frac{\sum \sum NSP_{b,t,s} \times 24}{T}; s = \{s_{min}, s_{max}\}$$
(41)

El modelo evaluado permite identificar la barra que requiere mayor capacidad y cuál es la opción más apropiada para suministrarla. La cantidad de PNS determinará la capacidad requerida para nuevas plantas eléctricas. La Tabla 6 reporta información para el Tesla 3 Model (2018).

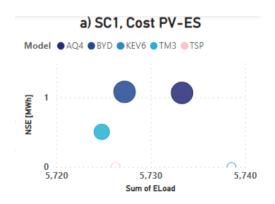
El estudio encontró que se expulsó ENS de la última barra del SP, que es la que está más alejada de las barras de generación (#14). La cantidad de ENS se incrementó a medida que aumentó el número de EV en cada escenario.

Tabla 6. Capacidad del nuevo sistema de potencia (NSP) para garant	tizar la operación normal, dada como un valor fijo
a lo largo del día: opción fotovoltaica – sistema de almacenamiento ((PVSA)

		Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3	
\mathbf{OPF}	$\operatorname*{\mathbf{BAU}}_{\cdot}$	Min	Max	$\operatorname*{\mathbf{BAU}}_{\boldsymbol{\cdot}}$	Min	Max	$\operatorname*{\mathbf{BAU}}_{\boldsymbol{\cdot}}$	Min	Max
	${f EV}$	MCS	MCS	$rac{ ext{sin}}{ ext{EV}}$	MCS	MCS	$rac{ ext{sin}}{ ext{EV}}$	MCS	MCS
Eg_{NPS} (MWh)	5975.91	5982.49	5998.33	5975.16	5982.75	6002.67	5962.67	5974.66	6004.41
$Loss_{NPS}$ (MWh)	271.36	271.91	273.51	270.62	271.25	273.25	258.12	259.1	262.01
$\begin{array}{c} \operatorname{Max} Pg_{NPS} \\ (\operatorname{MW}) \end{array}$	270.7	270.72	273.41	270.67	270.75	273.65	270.08	270.38	277.87
Capacidad de NPS (MW)		1.01			1.25			5.47	
Eg_{PSS} (MWh)	5978.9	5985.49	6001.34	5978.86	5986.45	6007.05	5978.13	5990.15	6020.07
$Loss_{PSS}$ (MWh)	274.36	274.91	276.52	274.31	274.95	277.63	273.58	274.59	277.67
$ \begin{array}{c} \operatorname{Max} Pg_{PSS} \\ (\operatorname{MW}) \end{array} $	270.82	270.83	273.41	270.82	270.84	273.65	270.71	270.72	277.87
Capacidad PV (MW)		0.177687			0.219993			0.965943	
Almacenamiento (MWh)		0.419278			0.519105			2.279288	
Barra (#)		14			14			14	
Costo PVSAt (\$)		345,397.68			427,634.56			1,877,658.44	

3.4. Capacidad del nuevo sistema de potencia para garantizar operación normal

El SP requiere capacidad adicional de generación para abordar el problema identificado. La sección de metodología ofrece opciones para obtener capacidad extra de generación usando microturbinas, máquinas de combustión interna, generación PV en conjunto con un sistema de almacenamiento, etc. La Figura 4 muestra el desempeño del SP y la potencia suministrada por el sistema PV-AE para la salida máxima de la MCS para el Tesla 3 Model. La Tabla 5 proporciona información acerca de la capacidad requerida del nuevo sistema de potencia (NSP). El costo del sistema PV-AE se reporta para cada escenario en las Figuras 5a, 5b, y 5c, variando desde \$ 0 a $\$7.40 \times 10^{+5}$ para el escenario 1, \$ $2.22 \times 10^{+5}$ a \$ 7.81 $\times 10^{+5}$ para el escenario 2 y \$ 5.88 $\times 10^{+5}$ to \$3.41 $\times 10^{+6}$ para el escenario 3. El costo de la primera opción para agregar capacidad para un día completo no se evalúa en este estudio, pero su CP se establece como constante, tal como la PNS del SP FOP.



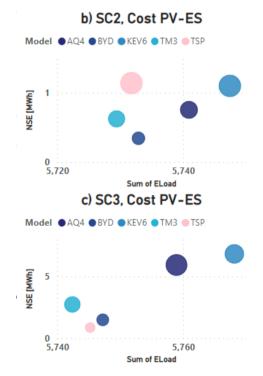


Figura 5. Comparación de la energía no servida (NSE) y costos fotovoltaico-almacenamiento de energía para los tres escenarios: (a) escenario 1, (b) escenario 2 y (c) escenario 3.

3.5. Resultados de la red de distribución

La sección 3.4 del estudio examina la relación entre carga y capacidad del SP. Se encontró que un aumento en la carga general no necesariamente requiere mayor capacidad del SP o incrementa el costo de generación PV y AE. Este estudio también muestra que la carga requerida por los modelos de EV no resulta en mayor PNS. Estos hallazgos sugieren que los requerimientos del SP y del modelo de EV son independientes.

Se utilizan técnicas de reducción de datos para sintetizar la gran cantidad de información procesada. Se realizaron dos reducciones en los datos, con errores de 1.24 % y 0.85 % en comparación con la data global. La reducción de 4 % de la data se utiliza para procesar la data en MATLAB mediante la herramienta Simulink. La data de la red de distribución se utiliza para redistribuir los EV entre los alimentadores del sistema de potencia IEEE de 14 barras, y el desempeño resultante de los alimentadores se muestra en la Figura 6. Los resultados indican que los valores de voltaje permanecen dentro del rango para todas las barras del sistema de potencia IEEE de 14 barras, aún bajo suposiciones de carga no controlada.

4. Conclusiones

En este estudio se muestra el efecto de la presencia de carga no controlada de EV en los mercados eléctricos, como puede verse en la Tabla 5 y en la Figura 2. Las salidas mínimas y máximas de las simulaciones Montecarlo dependen del consumo específico de los modelos de EV, cuyos valores se reportan en la Tabla 3. El modelo de EV que requirió más energía de la red de distribución fue el KIA EV6, mientras que el modelo que requirió menos energía fue el Tesla Model 3, como se muestra en la Figura 1e. El mayor consumo

del escenario 3 fue para el modelo KIA EV6, con 31.8 MWh, mientras que el menor consumo del escenario 1 fue para el Tesla Model 3, con 10.14 MWh.

Para los modelos específicos de EVs que requieren más energía, no se garantiza que la variable PNS sea necesaria. La Figura 5a muestra que los modelos que no tuvieron PNS fueron el KIA EV6 (que tiene el mayor requerimiento de energía) y el Tesla S Plaid. Las Figuras 5b y 5c también soportan este hecho debido a la intermitencia de las PNS máximas y mínimas que se presentan en las ejecuciones de FOP.

Por otra parte, la dependencia que se observa en la Figura 5 es la relación entre los costos de sistemas de generación PV – almacenamiento de energía de diferentes dimensiones y la cantidad de ENS diaria presente en la ejecución del FOP. Esta relación no es estrictamente lineal, pero para valores similares de ENS el costo del sistema diseñado es similar. Por ejemplo, en el escenario 3, el valor más alto de ENS es 6.84 MWh. El modelo de EV correspondiente es el KIA EV6. El costo relacionado con este punto es $\$ 2.84 \times 10^{+6}$. Sin embargo, el costo más alto entre los sistemas diseñados es $\$ 3.41 \times 10^{+6}$, con un valor de energía no servida de 5.94 MWh.

El impacto de la carga no controlada no es relevante en la distribución, como lo muestra la estabilidad de voltaje en el modelo ejecutado. Aún las barras más alejadas tienen valores de voltaje que cumplen con los límites de las normas peruanas de distribución eléctrica. Las barras 632, 645, 646 y 633 tienen niveles de voltaje bien distribuidos. Los restantes también tienen valores de acuerdo con las normas.

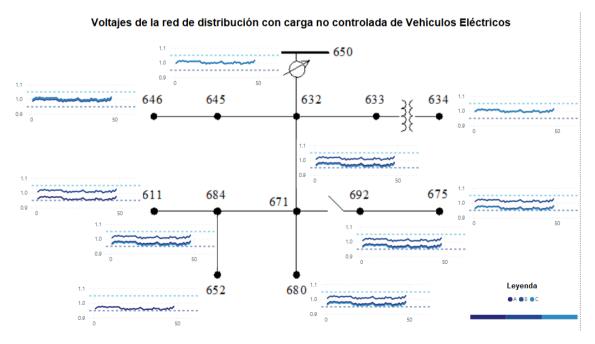


Figura 6. Voltaje Diario de la Red de Distribución para cada fase

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al "Programa de Doctorados en la Universidad Peruana", promovido por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) a través del Fondo Nacional para el Desarrollo Científico, Tecnológico e Innovación Tecnológica (FONDECYT).

Referencias

- [1] V. Vita and P. Koumides, "Electric vehicles and distribution networks: Analysis on vehicle to grid and renewable energy sources integration," in 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2019, pp. 1–4. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/BulEF48056.2019.9030787
- [2] L. Wang, S. Sharkh, and A. Chipperfield, "Optimal decentralized coordination of electric vehicles and renewable generators in a distribution network using a search," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 474–487, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.036
- [3] K. Mahmud, G. E. Town, S. Morsalin, and M. Hossain, "Integration of electric vehicles and management in the internet of energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 4179–4203, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.11.004
- [4] A. Ahmadian, M. Sedghi, B. Mohammadiivatloo, A. Elkamel, M. Aliakbar Golkar, and M. Fowler, "Cost-benefit analysis of V2G implementation in distribution networks considering PEVs battery degradation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 961–970, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2768437
- [5] R. R. Desai, R. B. Chen, and W. Armington, "A pattern analysis of daily electric vehicle charging profiles: Operational efficiency and environmental impacts," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, p. 6930932, Jan 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2018/6930932
- [6] J. H. Angelim and C. de Mattos Affonso, "Probabilistic assessment of voltage quality on solar-powered electric vehicle charging station," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106655, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106655

- [7] S. Kumar, R. Saket, D. K. Dheer, J. B. Holm-Nielsen, and P. Sanjeevikumar, "Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 10, pp. 1799–1815, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1402
- [8] C. W. Villanueva Machado, M. F. Bedriñana Aronés, and J. E. Luyo Kuong, Planificación de expansión de transmisión bajo condiciones de máxima generación con recursos energéticos renovables. Universidad Nacional de Ingeniería, 2018. [Online]. Available: https://bit.ly/3XfQZ8b
- [9] S. Pirouzi, J. Aghaei, T. Niknam, H. Farahmand, and M. Korpås, "Exploring prospective benefits of electric vehicles for optimal energy conditioning in distribution networks," *Energy*, vol. 157, pp. 679–689, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.195
- [10] S. Lazarou, V. Vita, C. Christodoulou, and L. Ekonomou, "Calculating operational patterns for electric vehicle charging on a real distribution network based on renewables' production," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en11092400
- [11] D. Schmerler Vainstein, J. C. Velarde Sacio, and B. Rodríguez González, Abel Solís Sosa, Electromovilidad. Conceptos, políticas y lecciones aprendidas para el Perú. Osinergmin, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/3NBY53W
- [12] AAP, Los protagonistas de la nueva era automotriz: Vehículos eléctricos e híbridos en el Perú. Asociación Automotriz del Perú, 2019. [Online]. Available: https://bit.ly/465w2kl
- [13] C. Villanueva, J. Luyo, A. Delgado, and C. Carbajal, "Electric vehicle aggregator participation in energy markets considering uncertainty travel patterns," *International Journal of Innovative Tech*nology and Exploring Engineering (IJITEE), vol. 8, no. 12, pp. 4994–4998, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.35940/ijitee.L3747.1081219
- [14] R. Jing, M. Wang, Z. Zhang, X. Wang, N. Li, N. Shah, and Y. Zhao, "Distributed or centralized? designing district-level urban energy systems by a hierarchical approach considering demand uncertainties," *Applied Energy*, vol. 252, p. 113424, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113424
- [15] A. Dammert, R. García Carpio, and F. Molinelli, Regulación y supervisión del sector eléctrico. Fondo Editorial Pontificia Universidad

- Católica del Perú, 2013. [Online]. Available: https://bit.ly/3p7rIQW
- [16] PSCAD, *IEEE 14 Bus System*. Manitoba HVDC Research Centre, 2014. [Online]. Available: https://bit.ly/3CxmAZt
- [17] T. Khatib and W. Elmenreich, "A model for hourly solar radiation data generation from daily solar radiation data using a generalized regression artificial neural net-
- work," International Journal of Photoenergy, vol. 2015, p. 968024, Oct 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2015/968024
- [18] A. Babajide and M. C. Brito, "Solar PV systems to eliminate or reduce the use of diesel generators at no additional cost: A case study of Lagos, Nigeria," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 209–218, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.088



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 la Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – REDALYC, en Emerging Sources Citation Index, ESCI de Clarivate Analitics, en SciELO Ecuador, 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).

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: 4.000 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>.

Para favorecer la diversidad de las publicaciones, el/los autor(es) no podrán publicar más de un(1) artículo por cada número, ni tampoco en números consecutivos, para que el/los autor(es) puedan enviar nuevamente a Ingenius sus investigaciones, deberán haber transcurrido como mínimo 3 números publicados.

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 documenNormas / Guidelines 137

to. 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 manuscritos3.1.1. 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 e 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 firman-

tes, 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 literatu-

- ra 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:

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

139 Normas / Guidelines

Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Pu- superior de la tabla justificado a la izquierda. blicados):

boada. "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:

"A [1] E. Η. Miller, note on [Online]. Available: flector arrays" 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

"Realidad Virtual". National Instruments. en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte

Las figuras pueden ser dibujos lineales, ma-[1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Tapas 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">https://goo.gl/4xxjuo, si el envío se lo realiza en formato Word, se de- mitir a través de la plataforma OJS. El equipo berá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar 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 y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito 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, y seguir el formato de 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.

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 reeditorial 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 v 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.

Normas / Guidelines 141

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números el mes de octubre serán considerados p por año, el 1° de enero y el 1° de julio por lo publicación de enero y aquellos que se re tanto es importante considerar las fechas para hasta abril para la publicación de julio.

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

Juan Cárdenas Tapia, 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

CANJE

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

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, Número 30, julio-diciembre 2023 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 ${\it Cuenca-Ecuador}$

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.



