

Número: 26

Redalyc 3.0

ESCI Web of science

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

julio / diciembre 2021

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Deposición convectiva rápida a escala nanométrica de materiales compuestos activos para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo

Pag. 9

- Apoyo a los subsistemas de talento humano, selección y reclutamiento a partir de un sistema experto. Caso de estudio

Pag. 41

- Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas

Pag. 71

- Análisis numérico de los mapas de patrones de flujo del refrigerante R600a en un colector/evaporador de una bomba de calor asistida por energía solar

Pag. 111

INGENIUS

INGENIUS • Número 26 • julio/diciembre 2021. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Computación y áreas afines.

Consejo de Editores

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

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

ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

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

TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO, PhD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil – Editor Asociado.

Consejo Científico

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

ELENA FORTUNATI, PhD, Universidad de Perugia, Italia.

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

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

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

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

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

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

GROVER ZURITA, PhD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

WALTER OROZCO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ÁLVARO ROCHA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FILIPPE ARAUJO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

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

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

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

CÉSAR SEQUEIRA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PhD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PhD, Universidad de Piura, Perú.

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

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

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

PAOLO BELLAVISTA, PhD, Universidad de Bologna, Italia.

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

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

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

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

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

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

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

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

Consejo de Revisores

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

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

ANDRÉS TELLO, MSC, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

VICTOR SAQUICELA, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

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

RICARDO CAYSSIALS, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

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

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

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

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

ALFONSO ZOZAYA, PhD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

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

LUIS MEDINA, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

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

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

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

RAFAEL SOTELO, PhD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

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

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

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

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

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

GERMÁN ZAPATA, PhD, Universidad Nacio-

nal de Colombia, Colombia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

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

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

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

EDUARDO 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, Medellín, Colombia.

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

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

PABLO AREVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

ROBERTO GAMBOA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

JORGE BERNARDINO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RENE VINICIO SANCHEZ LOJA, 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, Medellín, 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, Medellín, Colombia.

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

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

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

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

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

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

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

ERNESTO GRANADO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

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

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

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

PAOLA INGAVÉLEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CESAR ISAZA ROLDAN, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

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

RUBEN JERVES, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

GABRIEL LEON, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDILBERTO LLANES, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

LUIS LÓPEZ LÓPEZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

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

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

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

FABIO OBANDO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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
JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PhD
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PhD
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, PhD
RENÉ UNDA LARA, 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
PAOLA INGAVÉLEZ GUERRA, PhD
DAVID ARMENDÁRIZ GONZÁLEZ, MSc
LUIS ÁLVAREZ RODAS, PhD

Editor General

LUIS ÁLVAREZ-RODAS, PhD

Consejo Técnico

ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PhD
DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSc, Diagramación y Maquetación
JOEL MONTERO GALÁN

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 L^AT_EX.

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 26, junio – diciembre 2021

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

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

La revista utiliza el sistema antiplagio académico



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



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



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



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



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



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

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

BASE DE DATOS SELECTIVAS



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

El planeta ha sufrido una gran devastación debido a la pandemia de la COVID-19. Muchas personas han muerto y las que lograron vencer a la enfermedad quedan con secuelas físicas y psicológicas que marcarán el resto de su existencia. El panorama se vuelve más complicado si analizamos el impacto que ha generado la presencia del virus, en lo económico, social, laboral. También se han visto afectados los procesos de innovación y desarrollo debido a la disminuida interacción social que posibilita el entender de forma directa los problemas para buscar soluciones en donde la ciencia y la tecnología tienen un valor sustancial.

Pero la pandemia también nos ha generado grandes retos, y estos han sido asumidos con mucho compromiso y decisión por parte de la comunidad científica; se han buscado herramientas para mejorar la comunicación y la interrelación entre las personas, se han generado nuevas metodologías de enseñanza, se ha puesto al servicio de la sociedad todo el contingente tecnológico para dar soporte a la educación, al trabajo, a la comunicación y, por ende, a la investigación y al desarrollo.

La investigación no se ha detenido, algunas condiciones han cambiado, pero las alternativas de producción científica siguen vigentes. INGENIUS, al igual que otras publicaciones científicas, continúa trabajando al frente de los procesos en este espacio que consideramos de mucha valía para generar aportes que servirán para sostener el desarrollo de la sociedad.

Para este número se han receptado setenta y cinco contribuciones, las cuales fueron revisadas con el proceso editorial correspondiente y se aceptaron diez artículos científicos para su publicación. Las aportaciones publicadas corresponden a treinta y tres investigadores de España, Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela. Es importante recalcar que los trabajos están estructurados de manera conjunta

con autores de diferentes países, lo que le da un valor agregado fundamental, ya que demuestra la capacidad de formar redes internacionales que permiten desde diferentes realidades generar aportes sinérgicos de gran valía para el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

En el área de materiales Del Pozo y Mas-Torrent desarrollan su investigación en torno la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo; Guillacaso, Ramírez y otros establecen a la influencia del cromato de zinc en la corrosión de aceros expuestos a atmósferas salinas; Aparicio, Sortino y Jerez establecen la influencia del tratamiento de homogenizado previo al laminado en frío de la microestructura de un acero; estos trabajos aportan a identificar variables para proceso de producción y manufactura que podrían ser de mucha utilidad.

En el área automotriz, Taipe, Llanes y otros desarrollan un análisis experimental para evaluar un motor de encendido provocado bajo diferentes gasolinas, un aporte de gran interés para establecer parámetros de eficiencia en la transportación. Matute y Bojorque, Aguilar, Risco y Casaverde juntamente con Triviño, Franco y Ochoa nos muestran cómo la ciencia de la computación y el internet son una herramienta de gran importancia en muchos ámbitos, tanto para selección de talento humano dentro de un proceso administrativo como la clasificación de imágenes térmicas a nivel industrial y la convergencia en las telecomunicaciones. Otros autores como Tapia y Torres evalúan experimentalmente un pórtico plano; Dany Ochoa nos presenta una herramienta para estudios de red en régimen dinámico y Quitiaquez, Cortez y otros nos muestran una aplicación de refrigeración con energía solar validada experimentalmente; tres ámbitos industriales que servirán para trabajos futuros en el desarrollo industrial. El progreso continúa, el planeta no se detiene y la investigación e innovación pilares fundamentales para el desarrollo seguirán en auge para dar soporte a los nuevos retos que se presenten.

John Calle-Siguencia, PhD

EDITOR JEFE

ÍNDICE

Deposición convectiva rápida a escala nanométrica de materiales compuestos activos para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo	9
Rapid Convective Deposition at Nanoscale of Active Composite Materials for the Manufacture of Organic Field-Effect Transistors	
Freddy G. del Pozo, Marta Mas-Torrent	
Evaluación experimental de un motor de encendido provocado bajo diferentes gasolinas	17
Evaluation of an experimental induced ignition engine under different gasoline	
Víctor Alfonso Taipe-Defaz, Edilberto Antonio Llanes-Cedeño, César Fabricio Morales-Bayetero, Ana Elizabeth Checa-Ramírez	
Convergencia y matices de la neutralidad en la red en América del Sur	30
Convergence and nuances of Net Neutrality in South America	
Roberto D. Triviño, Antonio Franco-Crespo, Leonardo Ochoa-Urrego	
Apoyo a los subsistemas de talento humano, selección y reclutamiento a partir de un sistema experto. Caso de estudio	41
Support to the human talent subsystems, selection and recruitment from an expert system. Case study	
Karina Matute-Pinos, Rodolfo Bojorque-Chasi	
Evaluación de las propiedades dinámicas de un pórtico plano (MDOF) en una mesa vibratoria	49
Evaluation of the dynamic properties of a 2D-frame (MDOF) in a shake table	
Andrea Tapia Andrade, Wilson Torres Berni	
Influencia del recubrimiento de cromato de zinc en la corrosión de los aceros ASTM A-500 y A-500 galvanizado expuestos en una cámara de niebla salina	63
Influence of the Zinc Chromate coating on the corrosion of ASTM A-500 and galvanized A-500 steel exposed into a salt fog corrosion chamber	
Cristian Guilcaso, Leonidas Ramírez, Augusto Coque, Xavier Vaca, Diego Molina, Isaac Simbaña	
Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas	71
Transfer Learning for Binary Classification of Thermal Images	
Daniel Pérez-Aguilar, Redy Risco-Ramos, Luis Casaverde-Pacherrez	
Modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en un convertidor electrónico de potencia para estudios de red en régimen dinámico	87
Simplified Model of a Grid-Connection Interface Based on Power Electronic Converter for Grid Studies in Dynamic Regime	
Danny Ochoa	
Influencia del homogeneizado previo al laminado en frío en la microestructura del AA3003	99
Influence of homogenization preceding to cold-rolling on the microstructure of the AA-3003	
Gennifer Aparicio-Carrillo, Marco Ciaccia-Sortino, Ricardo Jerez	
Análisis numérico de los mapas de patrones de flujo del refrigerante R600a en un colector/evaporador de una bomba de calor asistida por energía solar	112
Numerical analysis of flow pattern map of R600a in a collector/evaporator of a solar-assisted heat pump	
William Quitiaquez, Eduardo Cortez, Karen Anchapaxi, C.A. Isaza-Roldán, César Nieto-Londoño, Patricio Quitiaquez, Fernando Toapanta-Ramos	
Normas editoriales	122
Guidelines	



DEPOSICIÓN CONVECTIVA RÁPIDA A ESCALA NANOMÉTRICA DE MATERIALES COMPUESTOS ACTIVOS PARA LA FABRICACIÓN DE TRANSISTORES ORGÁNICOS DE EFECTO DE CAMPO

RAPID CONVECTIVE DEPOSITION AT NANOSCALE OF ACTIVE COMPOSITE MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF ORGANIC FIELD-EFFECT TRANSISTORS

Freddy G. del Pozo^{1,*} , Marta Mas-Torrent²

Recibido: 24-07-2020, Recibido tras revisión: 04-12-2020, Aceptado: 03-02-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

Transistores orgánicos de efecto de campo basados en un material compuesto han sido fabricados por medio de la técnica de deposición convectiva rápida. La fabricación fue llevada a cabo bajo condiciones ambientales (aire, luz y humedad). En todos los casos, los transistores fabricados muestran un claro comportamiento de efecto de campo con características de semiconductor tipo-p, y exhiben movilidades en el orden de $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$, totalmente comparables con transistores obtenidos por evaporación térmica del mismo material activo. La técnica de deposición demuestra que se pueden obtener dispositivos con alta reproducibilidad y que en todos los casos muestran una baja tensión umbral de alrededor 1 V. Por lo tanto, se demuestra que la deposición convectiva rápida puede ser usada para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo sobre áreas amplias, con indicadores de reproducibilidad entre dispositivos y alta estabilidad en condiciones ambiente.

Palabras clave: transistores orgánicos de efecto de campo, deposición convectiva rápida, materiales compuestos

Abstract

Organic field-effect transistors based on composite materials has been manufactured using the rapid convective deposition technique. The manufacturing was carried out under environmental conditions (air, light and humidity). All manufactured transistors show a typical field-effect behavior with features of a p-type semiconductor, and exhibit field-effect mobilities around $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$, fully comparable with transistors manufactured using thermal evaporation of the same active material. The deposition technique demonstrates that devices may be manufactured with high reproducibility and in all cases with a low threshold voltage of approximately 1V. Therefore, it is demonstrated here that rapid convective deposition can be used to manufacture organic field-effect transistors on large surface areas, showing high reproducibility among devices and high stability at environmental conditions.

Keywords: Organic field-effect transistors, Rapid convective deposition, Composite Materials.

^{1,*}Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato – Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: fg.delpozo@uta.edu.ec.

²Departamento de Nanociencia Molecular y Materiales Orgánicos, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB – CSIC)/ CIBER – BBN, 08193 – Bellaterra – España.

Forma sugerida de citación: Del Pozo, F. G. y Mas-Torrent, M. (2021). «Deposición convectiva rápida a escala nanométrica de materiales compuestos activos para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 9-16. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.01>.

1. Introducción

El desarrollo de la electrónica orgánica, particularmente en las dos décadas pasadas, ha sido de vital importancia y ha producido grandes impactos en la comunidad de investigadores y en la industria electrónica. Algunos de los dispositivos con arquitectura orgánica, como los diodos orgánicos emisores de luz (OLED), hoy por hoy brillan con un gran éxito y en el momento están siendo producidos en serie. Así, es fácil ya encontrar en nuestra vida diaria dispositivos como televisores o celulares con pantallas basadas en OLED [1, 2].

Actualmente, los semiconductores han sido adoptados en un amplísimo rango de aplicaciones como pantallas, computadores, teléfonos, entre otros, volviéndose indispensables en nuestra vida cotidiana, y casi sin habernos dado cuenta.

Los núcleos de todos los dispositivos orgánicos son los semiconductores orgánicos (OS) y estos pueden ser usados como material activo de diversos dispositivos desde dispositivos unitarios (transistores, diodos, sensores) desarrollados en laboratorios de investigación, hasta circuitos complejos. El descubrimiento de los semiconductores orgánicos data ya de los años 1940 [3]. En el tenor de comparar con la electrónica tradicional basada en el silicio, la electrónica orgánica muestra características únicas, como procesamiento a partir de soluciones, flexibilidad mecánica e incluso una mezcla de conducción iónica y eléctrica, lo que hace que la electrónica orgánica haya captado el interés de muchos laboratorios de investigación en todo el mundo.

Los OS están caracterizados por ser moléculas conjugadas o incluso polímeros conjugados. Su estructura difiere enormemente de la de los tradicionales semiconductores inorgánicos, ya que en los OS son característicos los enlaces débiles de Van der Waals, mientras que en los semiconductores inorgánicos los enlaces covalentes prevalecen, además, los electrones π de los OS forman las bandas de valencia y de conducción. Algo muy importante de resaltar es que los OS, a diferencia de los semiconductores inorgánicos, no forman una capa de óxido nativo, por ende propician una interfaz limpia entre los materiales, ya que los materiales que pueden interactuar con los OS varían desde metales hasta organismos biológicos [4].

Los esfuerzos en investigación se han enfocado en la manipulación de las estructuras químicas de diversos OS, su grado de ordenamiento en capas nanométricas, como en el comprender y controlar los procesos de transporte que se desarrollan en las interfaces [5]. Sin embargo, con la finalidad de poder desarrollar dispositivos de bajo costo, es necesario el procesamiento de los OS con técnicas basadas en disoluciones de estos, para llegar a lo que se conoce como electrónica impresa.

Los semiconductores poliméricos gozan de una buena solubilidad en una amplia gama de disolventes

orgánicos, sin embargo, los semiconductores de moléculas pequeñas muestran problemas en su solubilidad [2].

El principio de operación de un transistor orgánico de efecto de campo (OFET) se basa en la aplicación de un campo eléctrico, el mismo que causa la formación de un canal de conducción en la interfaz del dieléctrico y el semiconductor orgánico. Las configuraciones típicas y más usadas son las que se muestran en la Figura 1 y se las conoce como de contactos superiores y de contactos inferiores.

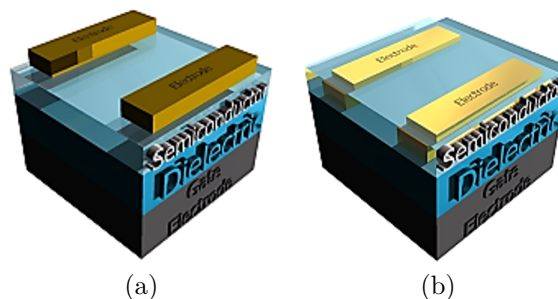


Figura 1. Configuraciones típicas usadas en la práctica de OFET: (a) contactos superiores, (b) contactos inferiores

En ambos casos, el semiconductor orgánico que se deposita en una capa de un dieléctrico está en contacto con dos electrodos metálicos, denominados fuente y sumidero; y en la parte inferior el electrodo de puerta es típicamente colocado. Entonces, la corriente que fluye entre la fuente y el sumidero (I_{SD}) puede ser modulada por el voltaje aplicado en el electrodo de la puerta (V_G) entre la fuente y la puerta. Este voltaje desarrolla un campo eléctrico y es él el responsable de la formación de una capa de acumulación de cargas en la interfaz semiconductor/dieléctrica. Además, dependiendo de la direccionalidad del voltaje aplicado en la puerta (V_G), la naturaleza de los portadores de carga que se acumulan en la interfaz pueden ser controlados, así, huecos para semiconductores tipo-p y electrones para semiconductores tipo-n [6].

Los OS pueden ser depositados sobre superficies en fase de vapor o en solución, los procesos son dependientes de la presión de vapor y de la solubilidad del material semiconductor. Los distintos métodos de deposición derivan en distintas morfologías de las películas resultantes, como también incrementan la variabilidad en el desempeño de los dispositivos elaborados. Sin embargo, durante los años pasados nuevos OS funcionalizados han emergido, se han añadido grupos funcionales que han mejorado la solubilidad de los núcleos conjugados rígidos. Esto ha permitido mejorar drásticamente la solubilidad sin perder las propiedades eléctricas inherentes, ni sacrificar su empaquetamiento molecular [2], [5].

De esta manera, un factor muy importante a considerar es la fabricación de capas a escala nanométrica que permita el depósito de OS funcionalizados o no,

sobre sustratos que posteriormente permitan la construcción de arquitecturas de transistores. Uno de los OS más prometedores que se han encontrado es el dibenzotetratíafulvaleno (DB-TTF), por ello fue seleccionado para este estudio [7–10]. Desde el punto de vista de los procesos de fabricación, las películas delgadas orgánicas han sido manufacturadas con procesos a bajas temperaturas, entre los cuales destaca el recubrimiento por centrifugación que es ampliamente usado en diversos laboratorios de investigación. El recubrimiento por centrifugación permite tener control sobre el espesor de las películas fabricadas que en su gran mayoría son homogéneas y sin rupturas; sin embargo, dicho método de procesamiento no puede ser escalado.

Lo que hace que el recubrimiento por centrifugación no se pueda usar en superficies grandes de procesamiento, debido a la necesidad de usar grandes cantidades de solución, lo que hace que el método de recubrimiento por centrifugación no sea viable para su aplicación en la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo fabricados sobre áreas extensas. Por esta razón, el desarrollo de técnicas de fabricación que reduzcan el desperdicio de la solución del OS, que típicamente es costosa, y que de igual manera la nueva técnica de fabricación permita el depósito de capas delgadas de materiales orgánicos sobre sustratos, es un interés de investigación constante. Dentro de los métodos poco convencionales, el autoensamblaje por convección es uno ampliamente usado para el depósito de recubrimientos sobre áreas extensas en una escala de tiempo pequeña.

Una forma de usar el autoensamblaje por convección, o también conocido como deposición convectiva rápida, es usar un recubridor de barra como el que se muestra en la Figura 2 para dispersar la solución del OS sobre el sustrato deseado y provocando el autoensamblaje de las moléculas seleccionadas sobre la superficie del sustrato [11], [12].

A pesar de las prometedoras características de los semiconductores tipo molécula pequeña, la fabricación de filmes homogéneos es complicada, sin embargo, para poder evadir esa dificultad, la ruta más prometedora hasta el día de hoy es el conformar materiales compuestos, en mezclas típicas de materiales poliméricos como matriz y como material activo el semiconductor orgánico. La aplicación de materiales compuestos ha facilitado enormemente la procesabilidad de los semiconductores orgánicos y, además, han mejorado la cristalinidad de las películas obtenidas, como también han mejorado la estabilidad de las películas frente a condiciones ambientales [2], [13].

2. Materiales y métodos

Los sustratos de silicio fueron adquiridos a Fraunhofer IPMS y tienen un dopaje tipo n, además de una capa de dióxido de silicio de 230 nm de espesor. Los electrodos de oro tienen una altura de 30 nm, y fueron depositados sobre una capa de óxido delgado de indio (ITO) de 10 nm de espesor, que actúa como una capa de adhesión. Las películas térmicamente evaporadas de dibenzo tetratíafulvaleno (DB-TTF) fueron preparadas a una velocidad lenta de evaporación de alrededor de $0,5 \text{ Å/s}$ sobre sustratos de Si/SiO₂ con contactos de ITO/Au, el espesor de las películas se determinó de 110 nm por medio de un análisis de AFM. Las películas delgadas del material compuesto activo fueron producidas al adaptar un recubridor comercial a las necesidades del experimento. DB-TTF y poliestireno para GPC Mw 10000 (PS10k) fueron adquiridos de Sigma-Aldrich y usados sin purificación subsecuente alguna.

En este estudio se usa poliestireno para GPC Mw 10000 (PS10k) junto con el semiconductor orgánico DB-TTF. Se prepararon soluciones al 2 % en clorobenceno anhidro tanto del polímero aislante como del semiconductor. Asimismo, usando la proporción 1:3 se preparó solución de semiconductor *versus* solución del polímero aislante en viales separados que, en todos los casos, las mezclas no superan el volumen de 500 μl . Silicio altamente dopado de tipo-n, y con un espesor de 200 nm de óxido de silicio nativo (dieléctrico) se usaron como sustrato y electrodo de puerta, respectivamente. Los sustratos empleados para los recubrimientos se adquirieron a Si-mat, en los cuales usando fotolitografía se diseñaron los electrodos que consisten en una capa de 4 nm de Cr (capa de adhe-

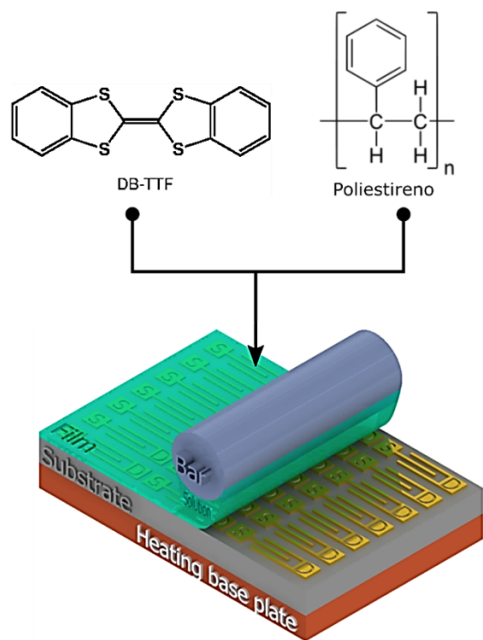


Figura 2. Esquema gráfico típico de la deposición convectiva rápida de polímeros aislantes, semiconductores y/o de sus mezclas

sión) y 40 nm de Au, ambos metales depositados por evaporación térmica. Los sustratos, previo a ingresar al proceso de recubrimiento, son limpiados con acetona e isopropanol, ambos disolventes de calidad HPLC. Finalmente, los sustratos son secados bajo una corriente de nitrógeno.

El equipo de recubrimiento fue precalentado a 105 °C antes de los experimentos. Los sustratos con electrodos prefabricados fueron limpiados previamente. Los sustratos tienen que ser dispuestos con cuidado en la máquina de recubrimiento; para realizar el mismo se usa una pequeña cantidad de solución correspondiente que oscila por 30 µl. La solución es depositada, y el menisco arrastrado a una velocidad constante de 10 mm/s; durante el proceso de deposición convectiva rápida, siempre el sustrato es mantenido estático y a 105 °C. Inmediatamente después del proceso de recubrimiento, los sustratos recubiertos son cuidadosamente removidos del equipo y dispuestos en cajas Petri, y luego sometidos a una etapa de curado en vacío ($P_{abs} = 7 \text{ kPa}$) y a 60 °C por al menos un periodo de 2 h, con la finalidad de remover cualquier vestigio de disolvente. Luego del curado, las características de los transistores son medidas a temperatura ambiente y en oscuridad.

Las fotografías de microscopía óptica fueron obtenidas usando un microscopio Olympus BX51 equipado con polarizador y analizador. El estudio de la sección transversal de las películas se realizó utilizando una estación de trabajo FIB-SEM Neon40 Crossbeam™ de Carl Zeiss. La topografía de la superficie de las películas depositadas fue estudiada gracias al uso de un SPM 5500LS de Agilent Technologies; el tratamiento de datos de topografía se realizó con el paquete informático Gwyddion. Las medidas de difracción de rayos X fueron realizadas con un difractómetro de Rigaku, equipado con un ánodo de fuente rotacional.

Las medidas eléctricas se realizaron con un Keithley 2612AB con una interfaz programada en MATLAB®, típicamente en una estación de pruebas Süss con sondas tipo punta y en oscuridad.

3. Resultados y discusión

La Figura 3 muestra una imagen obtenida por microscopía óptica de una película de DB-TTF:PS10 k en una razón de mezcla de 1:3 depositada en una arquitectura de contactos inferiores; se puede observar una película bien formada y libre de rupturas sobre toda el área fotografiada. Es importante el notar que, a pesar de ser una arquitectura de contactos inferiores, la película depositada es de carácter homogéneo.

Ya que una de las principales características de la molécula pequeña y semiconductora de DB-TTF es la cristalinidad, la Figura 4 presenta la imagen por microscopía óptica polarizada en la cual se muestra

y, claramente, se puede inferir las estructuras cristalinas (eferulitas) formadas; estas están embebidas en la película depositada por deposición convectiva rápida, y las redes cristalinas formadas junto con vías también cristalinas para el transporte de huecos entre los electrodos.



Figura 3. Fotografía obtenida por microscopía óptica de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3 el ángulo entre el polarizador y el analizador es de 0°



Figura 4. Fotografía obtenida por microscopía óptica de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3 el ángulo entre el polarizador y el analizador es de 90°

Cuando se usan materiales compuestos, los parámetros como la naturaleza del polímero, la relación entre el polímero y el material activo, combinados con los parámetros mecánicos del proceso de deposición vuelven a los sistemas complejos. En el campo de los semiconductores orgánicos, todas las fases cristalinas de los OS son obtenidas a pesar de que no lleguen al equilibrio termodinámico, así aquellas fases obtenidas deben modificar los parámetros extrínsecos. Estas fases cristalinas observadas serán nombradas en función de los polimorfos cinéticos. A pesar de que el DB-TTF muestra polimorfismo complejo se logra obtener una fase cinética cristalina, y en la Figura 4 se observa la fase cinética gamma que tiene formas tipo placa, las mismas son observables con facilidad a lo largo de los electrodos del dispositivo analizado. Debido a que

la técnica de deposición promueve una cristalización rápida, la misma tiende a formar la fase cristalina cinética más favorable [14–16].

Las Figuras 5 y 6 muestran los fotogramas obtenidos por FIB-SEM, técnica que es ampliamente usada para el estudio de secciones transversales de dispositivos y que, de igual manera, permite el estudio de las interfaces entre materiales, gracias a un haz de iones de Ga⁺ enfocado que es usado para la obtención de la imagen e incluso empleado para realizar nanoestructuración. Con la finalidad de calibrar y obtener un corte limpio, se evaporan 100 nm de Pt sobre la muestra, esto se observa en la Figura 5, juntamente con el agujero realizado.

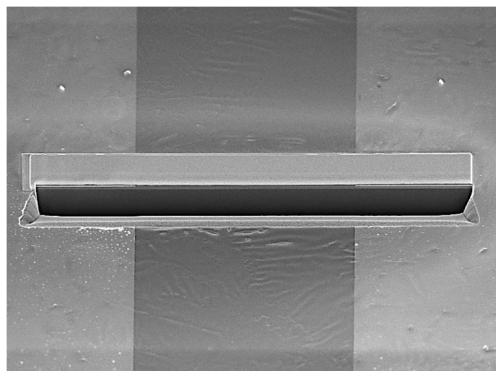


Figura 5. Imagen de FIB-SEM de un dispositivo típico fabricado de una película del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3. Mag = 6.89 kX, EHT = 5.00 kV, FIB Probe = 30 kV:10 pA, FIB Imaging = SEM, vacuum = 1.72e-6 mbar

Mientras que la Figura 6. muestra la sección transversal de la muestra, posterior a la rotación al interno del FIB-SEM que, además, se nota el Pt, el SiO_x, Si. Gracias a esta técnica se puede medir un espesor de 52,33 nm de la película depositada sobre el sustrato con contactos inferiores.

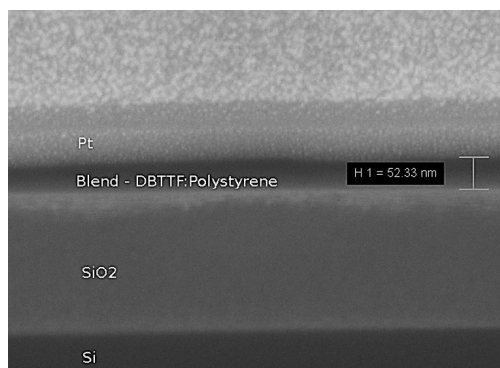


Figura 6. Imagen de FIB-SEM de la sección transversal de un dispositivo típico fabricado de una película del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3 Mag = 6,89 kX, EHT = 5,00 kV, FIB Probe = 30 kV:10 pA, FIB Imaging = SEM, vacuum = 1,72e-6 mbar

La Figura 7 fue obtenida por AFM, en la que se muestran estructuras no periódicas y no estructuradas en una región en particular de la película depositada. Además, se observa una variabilidad en su topografía con un máximo de 41,6 nm.

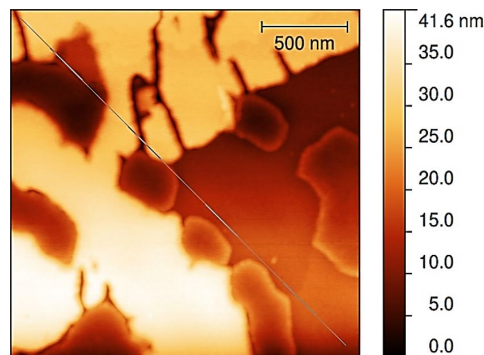


Figura 7. Imagen de AFM de un dispositivo típico fabricado de una película del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3

La Figura 8 muestra la rugosidad en función de la posición, y es obtenida a lo largo del perfil diagonal que se muestra en la Figura 7, así la película depositada muestra una rugosidad relativamente baja con un máximo de 2,0 nm en la posición aproximada de 1 μm positiva en el eje X. La superficie lisa es un indicativo de poder tener una interfaz limpia con el potencial en el futuro a ser usada para otras aplicaciones, como transistores orgánicos de efecto de campo con electrodos-puerta electrolíticos e incluso en el desarrollo de sensores [17].

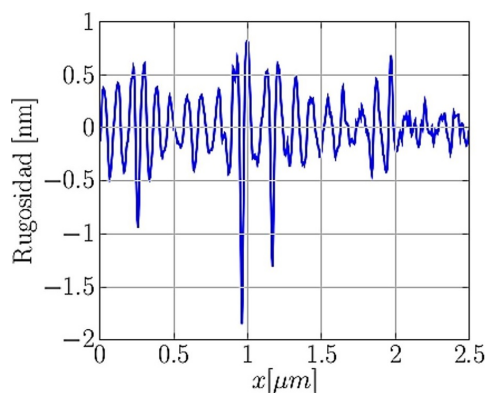


Figura 8. Rugosidad (nm) en función de la posición en el eje X [μm] extraída del perfil diagonal mostrado en la Figura 7, para un dispositivo típico fabricado de una película del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3

Debido a la naturaleza cristalina del material activo DB-TTF el estudio por difracción de rayos X es indispensable, ya que el conocimiento de la estructura cristalina es clave para poder determinar y comprender las características eléctricas de un material. La

Figura 9 muestra el difractograma, tanto de la película obtenida con la deposición convectiva rápida como la obtenida con el material puro DB-TTF evaporado térmicamente con la finalidad de comprobar la formación de redes cristalinas, y descartar que se obtenga una película amorfa.

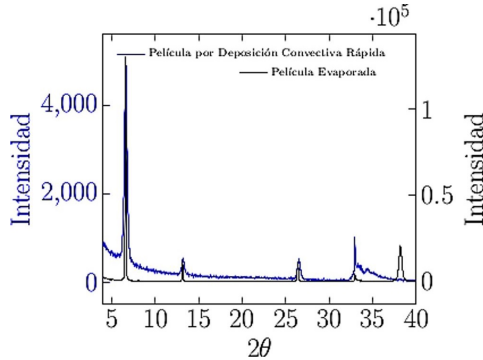


Figura 9. Difractograma de rayos X para una película térmicamente evaporada de DB-TTF, y de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3

Entonces, la Figura 9 muestra las coincidencias en los picos, los se observan a $6,72^\circ$, $13,48^\circ$, $20,22^\circ$, $27,08^\circ$ y $41,22^\circ$. Así se puede adscribir a la formación de la fase cristalina gamma según lo reportado por Brillante y colaboradores [18], sin embargo, la estructura cristalina de la fase gamma aún no ha sido resuelta. Notablemente, la celda unidad de la fase gamma contiene dos moléculas de DB-TTF, a pesar de que el incremento de volumen por molécula en esta fase *versus* el polimorfo-alfa indica que el polimorfo-gamma es una fase menos estable [14].

Las Figuras 10 y 11 muestran las características de salida y de transferencia para un dispositivo típico basado en el material compuesto activo DB-TTF:PS10k (1:3). La imagen de mérito mostrada en Figura 10 en su característica de salida muestra características que son reproducibles entre dispositivos y que muestran un comportamiento casi-ideal en su respuesta lineal y de saturación.

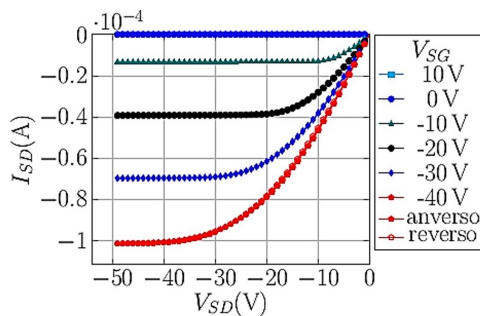


Figura 10. Característica de salida del OFET de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3. Dispositivo $L = 75 \text{ um}$, $W = 75000 \text{ um}$

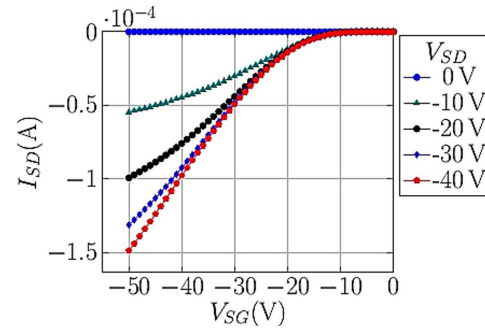


Figura 11. Característica de transferencia de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3. Dispositivo $L = 75 \text{ um}$, $W = 75000 \text{ um}$

Entonces, el dispositivo analizado eléctricamente muestra características típicas de efecto de campo, observadas en la Figura 10 de la característica de salida, en la cual es claro que el voltaje aplicado en la puerta modula la corriente medida entre los electrodos fuente y sumidero; de igual manera, se observa cómo la corriente fuente-sumidero tiende a saturar a medida que se acerca al voltaje aplicado en el electrodo de puerta. También es importante mencionar la mínima histéresis formada durante el mapeo de corrientes-voltajes en dirección positiva (barrido anverso) y en dirección opuesta (barrido reverso). Una característica distintiva de la existencia de trampas es la histéresis del dispositivo, donde existe una diferencia significativa entre los barridos anverso y reverso, esta puede ocurrir cuando las cargas se ven aprisionadas y luego liberadas, respectivamente y en conjunto puede darse debido a dieléctricos muy polares [5].

La Tabla 1 resume los valores de movilidad y de tensión umbral extraídas en el régimen de saturación para varias longitudes de canal; a pesar de la diferencia significativa en la longitud de canal, la movilidad permanece entre los mismos valores, sugiriendo la homogeneidad de fabricación entre distintos dispositivos seleccionados. La tensión umbral da a claras que los transistores necesitan muy poco voltaje para encenderse, y la característica de transferencia mostrada en la Figura 11 sugiere que existen al menos cuatro órdenes de magnitud entre el estado apagado y el estado encendido en los transistores orgánicos de efecto de campo fabricados.

Ya que los OFET son considerados y visionados para ser elementos en aplicaciones tecnológicas, la fabricación a bajo costo y la estabilidad al ambiente son factores cruciales a considerar [19]. De esta manera, y con la finalidad de probar la estabilidad en el tiempo bajo condiciones controladas, un transistor fue sometido a diversas mediciones al interior de una incubadora ($T = 25^\circ \text{C}$). Así, la Figura 12 muestra la característica de transferencia logarítmica medida sobre espacios de tiempo discretos; dicha gráfica sugiere que la estabilidad ha sido mejorada significativamente,

ya que filmes de DB-TTF evaporados térmicamente son extremadamente sensibles a condiciones ambientales [12], [20], [7].

Tabla 1. Resumen de datos de la movilidad y tensión umbral en función de la longitud del canal del transistor

Longitud de canal [μm]	Movilidad [$\text{cm}^2/\text{V.s}$]	Tensión umbral [V]
25	9,75e-3	-1,81
50	1,42e-2	0,38
75	1,02e-2	1,18
10	1,27e-2	-1,11

Nota. Todos los dispositivos son fabricados a partir de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3.

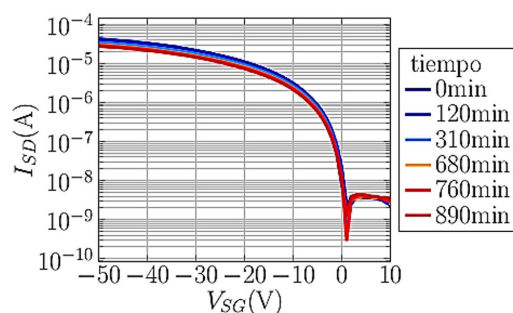


Figura 12. Característica de transferencia logarítmica para un dispositivo fabricado de una película típica del material compuesto DB-TTF y PS10k en una relación 1:3

4. Conclusiones

Transistores orgánicos de efecto de campo a partir de un material compuesto basado en un TTF como material activo, han sido satisfactoriamente fabricados a partir de una metodología basada en la deposición convectiva rápida a partir de una disolución del material compuesto. Para lograr estabilidad ambiental se escogió el poliestireno como matriz ligante. Todos los dispositivos fueron fabricados y medidos en condiciones ambientales de luz y humedad, exhibiendo una mejora drástica en su estabilidad en comparación con los fabricados por evaporación térmica. Las movilidades de los dispositivos fabricados oscilan el $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ con un $\pm 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V.s}$, dicha movilidad es perfectamente comparable con los dispositivos fabricados por evaporación térmica a partir de DB-TTF puro. Por lo tanto, se demuestra que la técnica de fabricación aplicada a un material compuesto provee una ruta prometedora para la fabricación de dispositivos de bajo costo y con alta estabilidad.

Agradecimientos

Freddy del Pozo quiere agradecer al Grupo NANOMOL del Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC) por haberme acogido durante la formación doctoral. También a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (Senescyt) por el financiamiento otorgado por medio de la beca de doctorado. A la Universidad Técnica de Ambato y a sus autoridades. Agradecimiento a la Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) de la Universidad Técnica de Ambato por el proyecto «Deposición de capas orgánicas semiconductoras a escala nanométrica para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo» aprobado con resolución 0911-CU-P-2016. Al doctor Puigdollers y al Centro de Nanoestructuración de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Referencias

- [1] P. K. L. Chan, “The motivation for and challenges to scaling down organic field-effect transistors,” *Advanced Electronic Materials*, vol. 5, no. 7, p. 1900029, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/aelm.201900029>
- [2] S. Riera-Galindo, F. Leonardi, R. Pfattner, and M. Mas-Torrent, “Organic semiconductor/polymer blend films for organic field-effect transistors,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 9, p. 1900104, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/admt.201900104>
- [3] C. Wang, H. Dong, L. Jiang, and W. Hu, “Organic semiconductor crystals,” *Chemical Society Reviews*, vol. 47, pp. 422–500, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C7CS00490G>
- [4] M. Fahlman, S. Fabiano, V. Gueskine, D. Simon, M. Berggren, and X. Crispin, “Interfaces in organic electronics,” *Nature Reviews Materials*, vol. 4, no. 10, pp. 627–650, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0127-y>
- [5] Z. A. Lamport, H. F. Haneef, S. Anand, M. Waldrip, and O. D. Jurchescu, “Tutorial: Organic field-effect transistors: Materials, structure and operation,” *Journal of Applied Physics*, vol. 124, no. 7, p. 071101, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5042255>
- [6] M. Mas-Torrent and C. Rovira, “Role of molecular order and solid-state structure in organic field-effect transistors,” *Chemical Reviews*, vol. 111, no. 8, pp. 4833–4856, 2011, pMID: 21417271. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/cr100142w>

- [7] K. Shibata, K. Ishikawa, H. Takezoe, H. Wada, and T. Mori, "Contact resistance of dibenzotetrathiafulvalene-based organic transistors with metal and organic electrodes," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 2, p. 023305, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.2834374>
- [8] B. Noda, H. Wada, K. Shibata, T. Yoshino, M. Katsuhara, I. Aoyagi, T. Mori, T. Taguchi, T. Kambayashi, K. Ishikawa, and H. Takezoe, "Crystal structures and transistor properties of phenyl-substituted tetrathiafulvalene derivatives," *Nanotechnology*, vol. 18, no. 42, p. 424009, sep 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/42/424009>
- [9] M. Mas-Torrent, P. Hadley, S. T. Bromley, X. Ribas, J. Tarrés, M. Mas, E. Molins, J. Veciana, and C. Rovira, "Correlation between crystal structure and mobility in organic field-effect transistors based on single crystals of tetrathiafulvalene derivatives," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 126, no. 27, pp. 8546–8553, 2004, pMID: 15238013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ja048342i>
- [10] M. Mas-Torrent, P. Hadley, S. T. Bromley, N. Crivillers, J. Veciana, and C. Rovira, "Single-crystal organic field-effect transistors based on dibenzo-tetrathiafulvalene," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 1, p. 012110, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.1848179>
- [11] T. Chonsut, A. Rangkasikorn, S. Wirunchit, A. Kaewprajak, P. Kumnorkaew, N. Kayunkid, and J. Nukeaw, "Rapid convective deposition; an alternative method to prepare organic thin film in scale of nanometer," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 5, Part 2, pp. 6134–6139, 2017, international Conference on Science and Technology of the Emerging Materials (July 27-29, 2016), Pattaya, Thailand. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.106>
- [12] F. G. D. Pozo, S. Galindo, R. Pfattner, C. Rovira, and M. Mas-Torrent, "Deposition of composite materials using a wire-bar coater for achieving processability and air-stability in Organic Field-Effect Transistors (OFETs)," in *Organic Field-Effect Transistors XIV; and Organic Sensors and Bioelectronics VIII*, I. Kymissis, R. Shinar, L. Torsi, I. McCulloch, and O. D. Jurchescu, Eds., vol. 9568, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2015, pp. 17–22. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2186521>
- [13] L. J. Richter, D. M. DeLongchamp, and A. Amassian, "Morphology development in solution-processed functional organic blend films: An in situ viewpoint," *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 9, pp. 6332–6366, 2017, pMID: 28414244. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00618>
- [14] A. Tamayo, S. Riera-Galindo, A. O. F. Jones, R. Resel, and M. Mas-Torrent, "Impact of the ink formulation and coating speed on the polymorphism and morphology of a solution-sheared thin film of a blended organic semiconductor," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 6, no. 22, p. 1900950, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/admi.201900950>
- [15] A. M. Hiszpanski, R. M. Baur, B. Kim, N. J. Tremblay, C. Nuckolls, A. R. Woll, and Y.-L. Loo, "Tuning polymorphism and orientation in organic semiconductor thin films via post-deposition processing," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 136, no. 44, pp. 15 749–15 756, 2014, pMID: 25317987. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ja5091035>
- [16] H. Chung and Y. Diao, "Polymorphism as an emerging design strategy for high performance organic electronics," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 4, pp. 3915–3933, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C5TC04390E>
- [17] A. Kyndiah, F. Leonardi, C. Tarantino, T. Cramer, R. Millan-Solsona, E. Garreta, N. Montserrat, M. Mas-Torrent, and G. Gomila, "Bioelectronic recordings of cardiomyocytes with accumulation mode electrolyte gated organic field effect transistors," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 150, p. 111844, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111844>
- [18] A. Brillante, I. Bilotti, R. G. Della Valle, E. Venuti, S. Milita, C. Dionigi, F. Borgatti, A. N. Lazar, F. Biscarini, M. Mas-Torrent, N. S. Oxtoby, N. Crivillers, J. Veciana, C. Rovira, M. Leufgen, G. Schmidt, and L. W. Molenkamp, "The four polymorphic modifications of the semiconductor dibenzo-tetrathiafulvalene," *CrytEngComm*, vol. 10, pp. 1899–1909, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/B810993A>
- [19] P. A. Bobbert, A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink, and D. M. de Leeuw, "Operational stability of organic field-effect transistors," *Advanced Materials*, vol. 24, no. 9, pp. 1146–1158, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/adma.201104580>
- [20] M. Mas-Torrent and C. Rovira, "Tetrathiafulvalene derivatives for organic field effect transistors," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, pp. 433–436, 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/B510121B>



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO BAJO DIFERENTES GASOLINAS

EVALUATION OF AN EXPERIMENTAL INDUCED IGNITION ENGINE UNDER DIFFERENT GASOLINE

Víctor Alfonso Taipe-Defaz¹ , Edilberto Antonio Llanes-Cedeño^{1*} ,
 César Fabricio Morales-Bayetero^{1,2} , Ana Elizabeth Checa-Ramírez¹

Recibido: 09-07-2020, Recibido tras revisión: 04-12-2020, Aceptado: 03-02-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

El motor de combustión interna de encendido provocado es una máquina térmica que permite obtener una potencia mecánica a partir de la energía química de un combustible. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un motor de combustión interna mediante el balance de energía y exergía, bajo el uso individual de las tres gasolinas comercializadas en el Ecuador (súper, extra y ecopaís). La metodología experimental consistió en la puesta en marcha bajo el uso individual de las gasolinas hasta alcanzar su máxima potencia a una velocidad de giro del motor, donde se tomaron mediciones de temperatura, consumo específico del combustible y la relación aire combustible para un tiempo de tres minutos. Los resultados muestran una eficiencia energética de 11,31 % para gasolina súper, 10,75 % para gasolina extra y 10,39 % para gasolina ecopaís. En lo relacionado a la eficiencia exergética se estableció un 58,81 % para la gasolina súper, 58,89 % para la gasolina extra y un 59,19 % para la gasolina ecopaís. Los resultados permiten concluir que existe un potencial exergético de mejoramiento que puede ser una oportunidad para aumentar la eficiencia energética.

Palabras clave: balance de energía, exergía, consumo energético, motor de encendido provocado.

Abstract

The internal combustion engine with provoked ignition is a thermal machine that enables obtaining mechanical power from the chemical energy of a fuel. The objective of this work was to evaluate the performance of an internal combustion engine through the balance of energy and exergy, under the individual use of the three types of gasoline sold in Ecuador (Super, Extra and Ecopais). The experimental methodology consisted of starting the engine with the individual use of gasoline until reaching its maximum power at engine speed, and taking measurements of temperature, specific fuel consumption and air-fuel ratio during 3 minutes. Results show an energy efficiency of 11.31% for the Super gasoline, 10.75% for the Extra gasoline and 10.39% for the Ecopais gasoline. Regarding exergy efficiency, 58.81% was established for the Super gasoline, 58.89% for the Extra gasoline and 59.19% for the Ecopais gasoline. Results enable us to conclude that there is an exergy potential for improvement that may be an opportunity to increase energy efficiency.

Keywords: energy balance, exergy, energy consumption, ignition motor induced.

^{1,*}Grupo de Investigación Eficiencia, Impacto Ambiental e Innovación en la Industria y el Transporte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Mecánica, Universidad Internacional SEK, Quito - Ecuador. Autor para correspondencia ✉: antonio.llanes@uisek.edu.ec.

²Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador.

Forma sugerida de citación: Taipe-Defaz, V. A.; Llanes-Cedeño, E. A.; Morales-Bayetero, C. F. y Checa-Ramírez, A. E. (2021). «Evaluación experimental de un motor de encendido provocado bajo diferentes gasolinas». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 17-29. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.02>.

1. Introducción

Los motores de combustión interna (MCI) poseen grandes aplicaciones en los sistemas de generación, cogeneración de energía e industria automovilística. Por lo tanto, ensayar y estudiar el rendimiento de estos motores es muy importante para contribuir a un mayor crecimiento de su campo de aplicación y calidad de operación [1, 2].

En general, los MCI tienen una mayor entrega y actividad en el sector del transporte, dentro del cual el uso de combustibles y el aumento de las emisiones están relacionados con procesos industriales que impulsan una fuerte actividad económica de comercialización y aseguramiento de bienes e insumos [3, 4]. En el Ecuador, el sector del transporte representa un 49 % del consumo energético total, donde el 98,3 % proviene del diésel y gasolinas, representando un 25 % de las emisiones de gases de efecto invernadero por la combustión de las gasolinas [5].

El MCI es la planta de energía más eficiente y confiable en el sector del transporte (motores de gasolina y diésel) y maquinaria pesada (motor diésel). Se espera que los motores MCI estén presentes hasta que: (i) la escasez de combustible se convierta en un problema grave; (ii) se desarrollen nuevas tecnologías menos contaminantes y más eficientes como reemplazo; o (iii) las regulaciones de emisiones, establecidas por agencias ambientales para mejorar la calidad del aire se vuelvan inalcanzables para los fabricantes de motores y vehículos [6].

La industria automotriz desde el siglo pasado ha venido analizando diseños de motores con el propósito de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero—dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO)— y material particulado (PM), responsables principales de la degradación del ambiente [7, 8]. También los MCI son diseñados para garantizar una potencia de salida específica combinada con la mayor eficiencia posible [9]. Las mejoras también se han incrementado gracias al uso de combustibles con mejores propiedades; uno de los factores importantes que determina la calidad de las gasolinas es el llamado octanaje [10]. El mismo no es más que una cuantificación de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas; su principal característica es identificar el proceso de la combustión en el interior del motor: un alto octanaje representa una mejor capacidad antidetonante. En Sudamérica, por ejemplo, las naftas con mayores índices de octano son Argentina y Perú con 98, seguido por Brasil con 95 y Colombia con 92 octanos, respectivamente [11]. En el Ecuador se venden tres tipos de gasolinas que provienen de las refinerías nacionales. Según la NORMA INEN 935, aquellas se clasifican de acuerdo con su octanaje en dos tipos:

- Gasolina súper con 92 octanos como mínimo.

- Gasolina extra y ecopaís con 87 octanos como mínimo.

El combustible ecopaís se define como un biocombustible el cual contiene una mezcla de 95 % de nafta premezclada y 5 % de etanol [12].

El desarrollo de la industria automotriz tiene un impacto en la escasez de energía [13], sin embargo, la creciente demanda de biocombustibles como una alternativa frente a la mitigación de las emisiones de gases y la disminución del consumo de combustibles derivados es solo una parte de la solución [14], por consiguiente, es necesario evaluar el rendimiento del motor mediante los análisis energéticos y exergéticos.

El análisis energético se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, como una forma eficiente de conocer las características de distribución de energía reflejadas en conversión, transferencia, utilización y pérdida de energía del combustible en términos de cantidad. Con esta característica como guía, se pueden utilizar medidas específicas para reducir la pérdida de energía. Sin embargo, el análisis energético no refleja la diferencia en la calidad energética, término que sí es considerado por el análisis exergético; este se fundamenta en la segunda ley de la termodinámica, el estudio de la exergía puede evaluar la calidad de la energía para lograr la reutilización total de la energía perdida [15]. Con respecto al análisis energético de los MCI, hasta el 55 % de la energía de entrada se cede al ambiente a través de los gases de escape y varios procesos de intercambio de calor entre la configuración del motor, el refrigerante y el aceite lubricante [16]. En la Figura 1 se indica los porcentajes de rendimiento que tiene un motor de MCI.

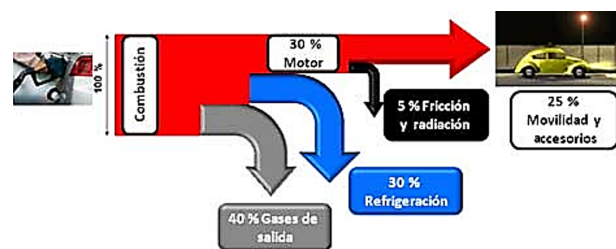


Figura 1. Diagrama Sankey en MCI [17]

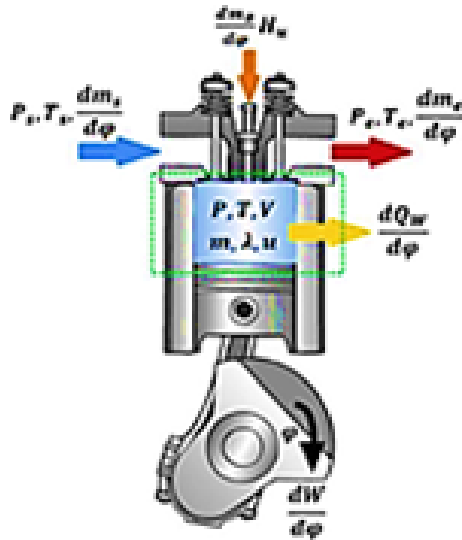
El MCI es un motor térmico que transforma la energía química en energía mecánica, generalmente, disponible en un eje de salida giratorio. La energía química del combustible se transforma primero en energía térmica mediante la combustión u oxidación con el aire en el interior del motor, luego de la combustión, los reactantes se transforman en productos como dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y monóxido de carbono (CO). La energía térmica incrementa la presión y la temperatura de los gases en el interior del motor, el gas a alta presión se expande contra los mecanismos mecánicos del motor [18].

La Universidad Internacional SEK, con el objetivo de reforzar los conocimientos y habilidades de los estudiantes en Ingeniería Automotriz, adquirió un banco experimental para MCI, específicamente de encendido provocado (MEP). Del mismo se desconoce su comportamiento energético a partir del uso de las gasolinas comercializadas en el Ecuador.

Por lo mencionado el actual estudio de investigación tiene como objetivo general: evaluar el desempeño de un motor de encendido provocado experimental mediante el balance de energía y exergía, bajo el uso individual de las tres gasolinas comercializadas en el Ecuador, para la valoración y evaluación de su rendimiento.

2. Materiales y métodos

La Figura 2 indica que las paredes de la cámara de combustión conforman los límites del sistema. Al utilizar la primera ley de la termodinámica se obtiene la descomposición de la energía del sistema, la Ecuación (1) que acompaña a la Figura 2 corresponde a decir que «el cambio de la energía del sistema (Esis), asumiendo que no hay pérdidas de energía en deformaciones del volumen de control, se reduce al cambio de la energía interna del sistema (U)» [19].



1. Energía del sistema (E_{sis})
2. Energía suministrada al sistema con el combustible (Q_{comb})
3. Carga de admisión ($m_{adm} \cdot h_{adm}$)
4. Trabajo mecánico (W)
5. Calor disipado a través del refrigerante (Q_{ref})
6. Calor degases de escape ($m_{esc} \cdot h_{esc}$)
7. Calor equivalente de los gases de la cámara que se fugan a través de intersticios entre los segmentos ($m_{fug} \cdot h_{fug}$)

Figura 2. Modelo termodinámico de un MCI [20, 21]

$$\frac{dE_{sis}}{dt} = \frac{dU}{dt} = \frac{dQ_{comb}}{dt} + \frac{dQ_{refr}}{dt} + \frac{dW}{dt} + \frac{dm_{adm}}{dt}h_{adm} + \frac{dm_{esc}}{dt}h_{esc} + \frac{dm_{fug}}{dt}h_{fug} \quad (1)$$

Para efectos prácticos de cálculo del balance energético del motor, la Ecuación (1) puede reescribirse como se muestra en la Ecuación (2) [21]:

$$Q_{comb} + m_{adm}h_{adm} = W + Q_{refr} \frac{dU}{dt} + m_{esc}h_{esc} + m_{fug}h_{fug} \quad (2)$$

En lo relacionado al alcance, el siguiente estudio es de tipo experimental, pues se fundamenta en el manejo de parámetros que miden el desempeño del motor tales como torque, velocidad de giro, potencia motor, flujo volumétrico y consumo específico del combustible en circunstancias estrictamente controladas, con el objetivo de explicar de qué modo o por qué se produce una circunstancia o situación particular [22].

El motor sujeto a estudio es un MEP CT 150 de 1 cilindro y 4 tiempos refrigerado con aire, con formación externa de la mezcla (carburador). Con un peso aproximado de 15 kg, dimensiones L × A × H (420 × 300 × 320 mm), potencia aproximada de 2,2 kW, volumen de aceite 0,6 L; tensión de encendido magnético, compresión 7:1, sonda térmica de temperatura de gases de escape de 0-1000 °C, accionado por polea de diámetro 125 mm, y correa trapezoidal tipo SPA 1250 (ver Figura 3).



Figura 3. Motor CT 150

Para la ejecución de la investigación, se emplearon los siguientes instrumentos y materiales (integrados en el banco experimental como se ilustra en la Figura 4:



Figura 4. Banco experimental. Motor a gasolina de 1 cilindro refrigerado por aire, y unidad universal de frenado y accionamiento HM 365

- Motor a gasolina de un cilindro refrigerado por aire.
- Unidad universal de frenado y accionamiento HM 365
- Motor asíncrono con convertidor de frecuencia
 - potencia: 2200 W
 - máx. velocidad: aprox. 3000 min⁻¹
 - máx. par: aprox. 12 Nm
- Operación de correa trapezoidal
 - longitud de la correa trapezoidal: 1157 mm, 1180 mm, 1250 mm
 - tipo de correa trapezoidal: SPA
 - diámetro de la polea de la correa trapezoidal: 125 mm
- Carga resistiva: 72 Ω, 2400 W
- Rangos de medida
 - par de torsión: ± 15 Nm
 - velocidad: 0... 5000 min⁻¹
- 400 V, 50 Hz, 3 fases
- 400 V, 60 Hz, 3 fases
- 230 V, 60 Hz, 3 fases
- Gasolina súper, extra y ecopaís (ver Tabla 1, características fundamentales)

Tabla 1. Propiedades de los combustibles

Parámetros	Súper	Extra	Ecopaís
Número de octanos (RON)	92	87	87
Contenido de azufre (%)	0,065	0,065	0,065
Contenido de gomas (mg/100 ml)	4	3	3
Contenido de aromáticos (% vol.)	35	30	30
Contenido de olefinas (% vol.)	18	18	18
Punto final de evaporación (°C)	220	220	220
Densidad (kg/m ³)	722	723	749
PCI (kJ/kg)	48345	45124	44739

Nota: Tomados del estudio realizado por Rocha-Hoyos, *et al.* [23]

Para la obtención de la curva de potencia se cumplió con los siguientes pasos:

- Colocar en marcha el motor a plena carga.
- Ajustar el potenciómetro de par (M) para ir frenando el motor (n) (disminuyéndose las rpm).
- Se registra el par (M) y el número de revoluciones (n) en una tabla (9 lecturas).
- Se repite el procedimiento para una segunda lectura y poder realizar un promedio.
- Para la obtención de la potencia se aplica la Ecuación (3):

$$P = \frac{2\pi nM}{60} \text{ (W)} \quad (3)$$

- Se realiza una gráfica de potencia (eje y) y rpm (eje x).

Para la obtención de la curva de consumo se cumplió con los siguientes pasos:

- Se realiza a unas revoluciones fijas (2500 rpm), ajustándose en el motor y se mide el tiempo en el cual se consumen 5,1 cm³ (el cual corresponde a 1 cm de descenso en la escala del tubo medidor, determinándose de este modo el flujo volumétrico Q) para un par fijado en el equipo.
- Los valores se van registrando para diferente par del motor (siempre manteniéndose en 2500 rpm), los resultados se registran en una tabla.
- Luego se realiza una tabla donde se registra la potencia, el flujo másico $\dot{m} = Q\rho_{fluido}$ (donde Q es el flujo volumétrico y ρ_{fluido} la densidad del combustible) y el consumo específico (b_e) obtenido por medio de la Ecuación (4):

$$b_e = \frac{\dot{m}}{P} \quad (4)$$

- Se realiza una gráfica de b_e (eje y) y P (eje x).

2.1. Cálculo del balance térmico

El balance energético de los MCI es básicamente un estudio de la primera ley de la termodinámica, que también se denomina balance de energía, balance de calor o balance térmico [20]. El análisis del balance térmico es una forma eficiente de conocer el flujo de energía, permite al diseñador evaluar la variación de energía interna en función de las transferencias de energía a través de los límites como calor o trabajo y las entalpías asociadas con el flujo de masa que cruza estos límites, para luego presentar un método altamente potencial que reduzca el consumo de combustible en los motores [24]. El balance térmico permite que se lleve a cabo la siguiente igualdad: Energía que entra al sistema = Energía que sale del sistema.

Desde otro punto de vista, para un proceso con flujo y estado estable se tiene el cumplimiento de la Ecuación (5).

$$\sum Q = \sum H_{entrada} - \sum H_{salida} \quad (5)$$

Donde:

$\sum Q$: sumatoria de calor evacuado al ambiente

$\sum H_{salida}$: sumatoria de entalpías que salen del sistema

$\sum H_{entrada}$: sumatoria de entalpías que entran al sistema

Lo anterior significa que, la suma de los calores que cruzan el sistema es igual a la diferencia entre la suma de entalpías que ingresan al sistema y la suma de entalpías que salen del sistema [19]. El cambio de entalpía, por su parte, es una medida de la cantidad de energía absorbida o entregada en un sistema termodinámico, es decir, es el cambio que se produce por una transformación en la que se puede recibir o aportar energía (como en el presente caso de estudio, energía mecánica), por lo que se puede considerar a la entalpía como numéricamente igual al calor intercambiado con el ambiente. Para resolver el balance térmico, se toma en cuenta los siguientes cálculos generales.

2.1.1. Flujo másico de combustible (Ecuación 6)

$$\dot{m}_c = \rho \frac{V}{\Delta t} \quad (6)$$

Donde:

\dot{m}_c = flujo másico de combustible (kg/s)

ρ = densidad específica de combustible (kg/m³)

V = volumen de combustible (m³)

Δt = tiempo de flujo (180 s)

2.1.2. Calor liberado por el combustible (Ecuación 7)

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot PCI \quad (7)$$

Donde:

\dot{Q}_c = Calor liberado por el combustible (kW)

PCI = poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

2.1.3. Flujo de los gases de escape (Ecuación 8)

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb} \quad (8)$$

Donde:

\dot{m}_{ar} = flujo de aire (kg/s)

\dot{m}_{comb} = flujo másico de combustible (kg/s)

La eficiencia energética del sistema se determina según la Ecuación (9).

$$\eta_{energético} = \frac{P_{máx}}{\dot{Q}_c} \quad (9)$$

Donde:

$P_{máx}$ = potencia máxima del motor

\dot{Q}_c = calor liberado por el combustible

2.2. Balance exergético

La exergía se establece como el análisis de rendimiento del sistema basado en la segunda ley de la termodinámica. La exergía es la cantidad de «energía disponible» en el sistema. El análisis de exergía se utiliza para definir el tipo, la ubicación y el alcance de las pérdidas de energía en diversas partes de un MCI [25]. La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo teórico útil, que se puede conseguir cuando un sistema llega al equilibrio termodinámico con su entorno. La destrucción de exergía o las irreversibilidades van acompañadas de la generación de entropía. El objetivo principal de un análisis exergético es conceptualizar

el diseño óptimo para un sistema, los parámetros de diseño y operación tienen efectos considerables en el balance de exergía durante las operaciones del motor [26].

Se pueden identificar tres fuentes principales de destrucción de exergía: irreversibilidades en el cilindro, irreversibilidades mecánicas y otras formas de irreversibilidad. En el cilindro se explican los efectos de la transferencia de calor de los gases a la pared del cilindro, la combustión y la viscosidad. Las irreversibilidades mecánicas son causadas por la fricción, que puede calcularse por la diferencia entre la potencia de frenado indicada. Otras irreversibilidades explican la suma de diversos procesos irreversibles, como las pérdidas de bombeo, el proceso de mezcla de aire y combustible, el estrangulamiento y la transferencia de calor desde la pared al sistema de enfriamiento [27].

El balance de exergía se determina mediante la siguiente metodología:

Exergía asociada al calor de combustible (Ecuación (10)):

$$E_{\chi_c} = \dot{m}_c PCI \quad (10)$$

Donde:

E_{χ_c} = Exergía del combustible (kW)

PCI = poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

Otra sección muy fundamental del balance exergético es el flujo de gases de escape del motor. El calor específico utilizado se determina sobre la base de una media de los valores de los calores específicos, en las respectivas temperaturas de entrada y salida, de funcionamiento del motor (Ecuación 11):

$$\dot{E}_{\chi_g} = \dot{m}_g \left\{ C_P T_0 \left[\left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

Donde:

\dot{E}_{χ_g} = Exergía asociada al flujo de gas (kW)

\dot{m}_g = Caudal de gas (kg/s)

C_P = Calor específico a presión constante (kJ/kg K)

T_0 = Temperatura de referencia (K)

T = Temperatura de los gases de salida (K)

El rendimiento exergético se determina a partir de la Ecuación (12):

$$\eta_{exergética} = \frac{\sum E_{flujos \text{ de entradas}} - \sum E_{flujos \text{ de salidas}}}{\sum E_{flujos \text{ de entradas}}} \quad (12)$$

El calor específico del aire a una temperatura T (K), está dado por la Ecuación (13):

$$c_{par,T} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 \quad (J/kgK) \quad (13)$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

Donde:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1,0189 \times 10^3 \\ c_1 &= -1,3784 \times 10^{-1} \\ c_2 &= 1,9843 \times 10^{-4} \\ c_3 &= 4,2399 \times 10^{-7} \\ c_4 &= -3,7632 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

El calor específico a presión constante de los gases de combustión está dado por la Ecuación (14):

$$c_{p \ g,T} = c_{par,T} + \frac{f}{1+f} \theta_{Cp,T} \quad (J/kgK) \quad (14)$$

Donde:

$$f = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}} \quad (15)$$

$$\theta_{Cp,T} = C_{P_0} T + C_{P_1} T^2 + C_{P_3} T^3 + C_{P_4} T^4 + C_{P_5} T^5 \quad (16)$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

$$\begin{aligned} c_{p0} &= -3,5949 \times 10^2 \\ c_{p1} &= 4,5164 \times 10^0 \\ c_{p2} &= 2,8116 \times 10^{-3} \\ c_{p3} &= -2,1709 \times 10^{-5} \\ c_{p4} &= 2,8689 \times 10^{-8} \\ c_{p5} &= -1,2226 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

2.3. Diseño experimental

Para el análisis y comparación de los resultados se emplea el *software Statgraphics Centurion XVI*, realizándose un ANOVA simple para los diferentes tratamientos (combinaciones) que se muestran en la Tabla 2. Se realizaron tres repeticiones de cada tratamiento según lo establecido por la norma NTE INEN 2205 [28] en el apartado 6 sobre métodos de ensayo donde en el punto 6.1.5.4 refiere «Registrar y promediar un mínimo de tres lecturas en cada prueba». Como variable independiente se tiene el combustible con tres niveles (extra, súper y ecopaís), las variables dependientes son eficiencia energética y exergética.

Para determinar si entre los grupos experimentales existe diferencia significativa, se usó el análisis ANOVA, aplicándose pruebas de comparación múltiple de medias, para este caso la LSD (*Least Significant Difference*) en un 95 % de confianza [29, 30].

Tabla 2. Propiedades de los combustibles

Número de tratamientos	Autos	Combustibles
T1	Motor CT 150	Súper
T2	Motor CT 150	Extra
T3	Motor CT 150	Ecopaís

3. Resultados y discusión

En la Tabla 3 se reflejan los resultados de las nueve mediciones de revolución y par, variables necesarias para el cálculo de la potencia y la gráfica *P vs. n*.

La Figura 5 indica la potencia en función de la velocidad de giro del motor, se observa que a medida que la velocidad de giro aumenta, la potencia generada también aumenta, pero solo hasta alcanzar su potencia máxima. La máxima potencia generada con el uso de la gasolina súper es 1174,17 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3199 rpm. La máxima

potencia generada con el uso de la gasolina extra es 1142,46 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3121,5 rpm.

La máxima potencia generada con el uso de la gasolina ecopaís es 1183,35 W que corresponde a una velocidad de giro del motor de 3224 rpm. En resumen, se obtiene que por debajo de 3000 rpm no hay diferencias en el comportamiento de la potencia, no siendo así entre 3000-3600 rpm donde la gasolina ecopaís y súper presentan los mejores resultados. Estos resultados son compatibles con el trabajo de [31] y Quimbita y Guallichico [32], donde se realizaron pruebas de potencia con gasolinas extra y súper obteniéndose la misma tendencia de comportamiento con el estudio desarrollado.

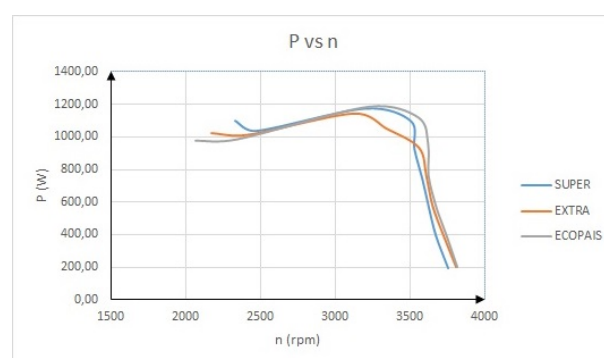


Figura 5. Curvas Potencia vs. revolución

Tabla 3. Valores tabulados de revolución, par y potencia

Súper			Extra			Ecopaís		
n (rpm)	M (Nm)	P(W)	n (rpm)	M (Nm)	P(W)	n (rpm)	M (Nm)	P(W)
3753	0,5	196,51	3808,5	0,495	197,42	3815	0,5	199,75
3671	1,03	395,96	3724	1,005	391,93	3743	1,005	393,93
3624	1,5	569,26	3650,5	1,505	575,33	3671,5	1,5	576,72
3579,5	1,995	747,81	3609	2,005	757,76	3623	2,01	762,59
3528	2,505	925,48	3559,5	2,5	931,87	3621	2,5	947,98
3501,5	3	1100,03	3342	3	1049,92	3554	3,005	1118,38
3199	3,505	1174,17	3121,5	3,495	1142,46	3224	3,505	1183,35
2474,5	4,005	1037,81	2412,5	4,005	1011,81	2340	4,01	982,63
2333	4,5	1099,4	2169	4,5	1022,12	2067,5	4,505	975,37

En la Tabla 4 se refleja los resultados de las seis mediciones de potencia y flujo másico, parámetros necesarios para el cálculo del consumo específico (b_e).

La Figura 6 indica el consumo específico de combustible en función de la potencia generada; cuando la potencia aumenta el consumo específico del combustible disminuye hasta aproximadamente los 600 W, a partir de este valor se empieza a experimentar un ligero incremento, los mayores consumos se producen a bajas revoluciones. Este resultado es compatible con el obtenido por Alzate y Agudelo [3], quienes realizaron pruebas dentro de un régimen de operación desde

1100 rpm hasta 3600 rpm, desde 1100 rpm hasta 2000 rpm el consumo específico del combustible fue disminuyendo hasta alcanzar su mínimo valor, desde ahí en adelante este fue creciendo en función del aumento de la velocidad de giro del motor. En resumen, se puede concluir, que el comportamiento del consumo específico para las tres gasolinas no es significativo, al igual que resultados obtenidos por el estudio de Quimbita y Guallichico [32], donde se observa un consumo específico del combustible de 47,44 g/kWh para gasolina súper, 43,17 g/kWh para gasolina extra y 49,96 g/kWh para gasolina ecopaís.

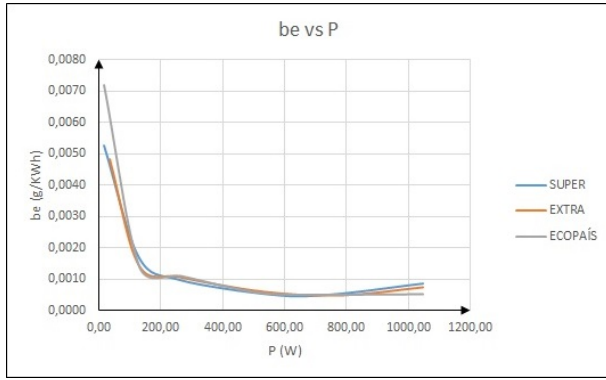


Figura 6. Curvas consumo específico *vs.* potencia

En la Tabla 5 se refleja, los resultados de las mediciones necesarias para el cálculo del balance térmico del MCI a máxima potencia realizadas a las gasolinas súper, extra y ecopaís; y en la Tabla 6 se indican las variables obtenidas al aplicar la metodología descrita en el apartado del método. Tal como se indica en la Tabla 4, la eficiencia energética de la gasolina súper es de 11,31 % y la eficiencia exergética es de 58,81 %; gasolina extra 10,75 % y 58,89 %; gasolina ecopaís 10,39 % y 59,19 %, respectivamente, esto es debido a que hay una cantidad de exergía que se está destruyendo en los gases de escape y que podría ser aprovechada para generar trabajo.

Tabla 4. Valores tabulados de potencia, flujo másico y consumo específico para las diferentes gasolinas experimentadas

Súper			Extra			Ecopaís		
P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)	P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)	P(W)	m(kg/h)	be (g/kwh)
18,33	0,096	0,0053	36,652	0,1777	0,0048	15,708	0,1132	0,0072
130,9	0,22	0,0017	130,9	0,1891	0,0014	130,8997	0,1817	0,0014
261,8	0,254	0,001	264,417	0,2824	0,0011	264,4174	0,2938	0,0011
562,87	0,277	0,0005	534,071	0,3222	0,0006	526,2168	0,3003	0,0006
748,75	0,373	0,0005	785,398	0,3836	0,0005	785,3982	0,4045	0,0005
1047,2	0,89	0,0008	1047,198	0,7808	0,0007	1047,1976	0,5567	0,0005

Tabla 5. Valores promedios tabulados para el cálculo de la eficiencia energética y exergética a potencia máxima

M_{max} (Nm)	P_{max} (W)	Consumo (m ³)	\dot{Q} (m ³ /s)	P_c (kg/m ³)	\dot{m}_c (kg/s)	\dot{m}_{aire} (kg/s)	\dot{m}_{gas} (kg/s)	\bar{T}_e (°C)	\bar{T}_s (°C)	PCI (kJ/kg)
Gasolina súper										
3,505	1174,17	53,55	2,97 E-07	722	0,0002148	0,002071	0,002286	22,77	543	48345,66
Gasolina extra										
3,495	1142,46	58,65	3,26 E-07	723	0,0002356	0,002046	0,002282	23,72	543,5	45124,76
Gasolina ecopaís										
3,505	1183,35	61,2	3,40 E-07	749	0,0002547	0,00206	0,002315	23,77	541,5	44739,17

Nota: Los valores de PCI fueron tomados de estudio de Rocha-Hoyos *et al.* [23]

Tabla 6. Resultados promedios del rendimiento energético y exergético calculados a potencia máxima

P_{max} (W)	\dot{Q}_c (kW)	η_{ener} %	$E_{\chi g}$ (kW)	$E_{\chi c}$ (kW)	$E_{\chi k}$ (kW)	η_{ener} %
Gasolina súper						
1174,17	10,38	11,31	0,64	10,38	3,63	58,81
Gasolina extra						
1142,46	10,63	10,75	0,65	10,63	3,72	58,89
Gasolina ecopaís						
1183,35	11,39	10,39	0,66	11,39	3,99	59,19

Nota: La exergía por transferencia de calor por conducción y convección se ha designado como $E_{\chi k}$, estimando en un 35 % de $E_{\chi c}$, según Li *et al.* [7].

Tener una eficiencia exergética mayor a una eficiencia energética, quiere decir que hay un potencial exergético de mejoramiento (PEM) mediante el cual se puede aprovechar parte de esa exergía que se está destruyendo y convertirla en trabajo, logrando así aumentar la eficiencia térmica [33].

Los resultados obtenidos son compatibles con el trabajo de González *et al.* [33], donde se obtuvo una eficiencia exergética de 14,77 % que es superior a la eficiencia energética de 12,79 %, concluyendo que esta diferencia se origina debido al aumento de las velocidades de giro del motor en un 43,19 %.

Por otra parte, según Llerena [34], al principio de su estudio, obtuvo una eficiencia energética del 39 % y una eficiencia exergética del 79 %, luego se presenta una eficiencia exergética reducida a 56 % debido al uso de los gases de escape que salen de la turbina para generar vapor (cogeneración), logrando así aumentar la eficiencia energética a un 67 %.

En la Tabla 7 y Figura 7, se representa la prueba de múltiple rango y gráfico de caja y bigotes para la variable dependiente eficiencia energética. Se concluye que existe diferencia significativa entre las gasolinas, siendo la súper la de mejor resultado.

Tabla 7. Análisis de diferencias significativas de la eficiencia energética

Combustible	Casos	Media	Grupos homogéneos
T3 (ecopaís)	3	10,39	X
T2 (extra)	3	10,75	X
T1 (súper)	3	11,31	X

Nota: Método: 95,0 porcentaje LSD

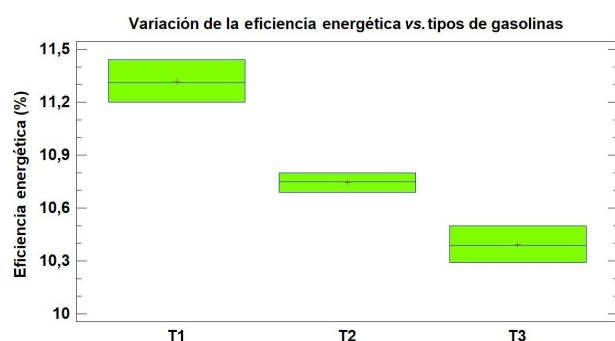


Figura 7. Gráfico comparativo de la eficiencia energética para las distintas gasolinas

Por su parte en la Tabla 8 y Figura 8, se representa la prueba de múltiple rango y gráfico de caja y bigotes para la variable dependiente eficiencia exergética, donde se concluye que existe diferencia significativa entre las gasolinas, siendo la ecopaís la de mejor resultado, sin embargo, entre la extra y súper no hay diferencia significativa.

Tabla 8. Análisis de diferencias significativas para la eficiencia exergética

Combustible	Casos	Media	Grupos homogéneos
T1 (súper)	3	58,8	X
T2 (extra)	3	58,89	X
T3 (ecopaís)	3	59,19	X

Nota: Método: 95,0 porcentaje LSD

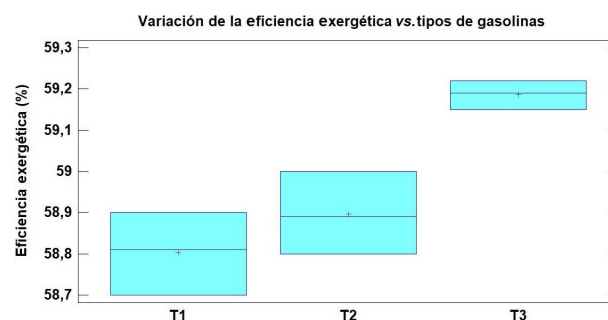


Figura 8. Gráfico comparativo de la eficiencia exergética para las distintas gasolinas

Para una mejor visualización de los resultados de la parte energética se presentan los valores de flujo de energía en la Tabla 9, así como también las Figuras 9, 10 y 11, las cuales representan los diagramas de Sankey para los tres tipos de gasolinas utilizadas. Estos diagramas representan la distribución cuantitativa de los flujos de energía que entran y salen del sistema, así como las pérdidas por transferencia de calor y emisión de gases de escape.

Tabla 9. Valores de flujo de energía

Flujo energético (kW)			
Gasolina	Súper	Extra	Ecopaís
Combustible	10,38	10,63	11,39
Gases de escape	5,58	5,77	6,22
Pérdida por convección	3,63	3,72	3,99
Potencia de eje	1,17	1,14	1,18

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina súper es 9,21 kW (88,73 %) como se indica en la Figura 9, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 11,31 % y una eficiencia exergética de 58,81 %.

Por otro lado, la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina extra es 9,49 kW (89,28 %) como se indica en la Figura 10, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 10,75 % y una eficiencia exergética de 58,89 %.

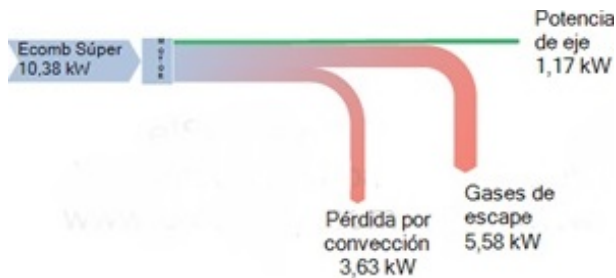


Figura 9. Diagrama de Sankey-Gasolina súper

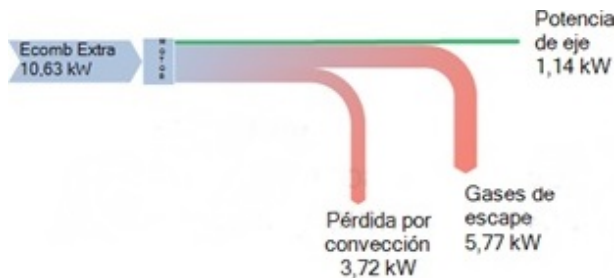


Figura 10. Diagrama de Sankey-Gasolina extra

Por último, la cantidad de pérdida de energía en el motor estudiado bajo el consumo de gasolina ecopaís es 10,21 kW (89,64 %) como se indica en la Figura 11, con lo cual se determinó que el motor tiene una eficiencia energética de 10,39 % y una eficiencia exergética de 59,19 %.

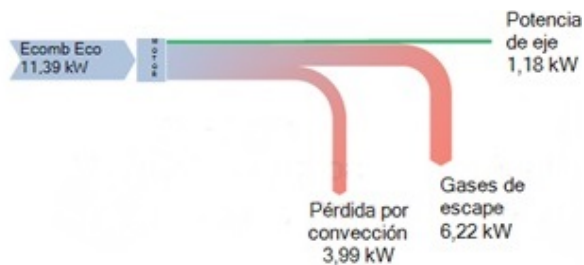


Figura 11. Diagrama de Sankey-Gasolina ecopaís

Con los resultados presentados se puede concluir que hay variaciones en el rendimiento energético y exergético en el motor estudiado al utilizar las tres gasolinas, se obtiene una mejor eficiencia energética de 11,31 % al usar gasolina súper. También se observa que la mayor pérdida de energía en el motor se presenta con el uso de la gasolina ecopaís de 10,21 kW (89,64 %), esta pérdida de energía se da en la emisión de los gases de escape y la transferencia de calor por conducción y convección, consecuente con los resultados de Llanes-Cedeño, Carguachi-Caizatoa, y Rocha-Hoyos [19], a la vez representa un alto potencial exergético de mejoramiento el cual puede ser aprovechado para generar trabajo y a la vez lograr aumentar la eficiencia energética del motor al usar la gasolina ecopaís, estos resultados son compatibles con los obtenidos por Valle

et al. [35], donde se obtuvieron pérdidas de energía igual a 8,57 kW (66,35 %) de un total de 12,92 kW (100 %).

4. Conclusiones

El motor estático que fue estudiado bajo el consumo de diferentes gasolinas, presenta una eficiencia energética de 11,31 % para gasolina súper, 10,75 % para gasolina extra y 10,39 % para gasolina ecopaís. En lo relacionado a la eficiencia exergética se determinó un 58,81 % para la gasolina súper, 58,89 % para la gasolina extra y un 59,19 % para la gasolina ecopaís. La eficiencia exergética es mucho mayor a la eficiencia energética en cada uno de los casos, existiendo un potencial exergético de mejoramiento (PEM) que puede aprovechar la exergía que se está destruyendo para convertirla en trabajo y así lograr aumentar la eficiencia energética.

La potencia máxima del motor es directamente proporcional a la eficiencia energética, por lo tanto, se puede concluir que la mejor eficiencia energética del motor que se obtuvo es bajo el consumo de la gasolina súper con una potencia máxima generada de 1183,35 W a 3224 rpm y una eficiencia energética de 11,31 %.

A partir de la metodología aplicada se determinaron eficiencias energéticas en el rango de 10,39 % a 11,31 %, las cuales son muy bajas en comparación a las eficiencias térmicas reales de un motor de combustión interna las cuales oscilan entre el 25 % al 30 %.

Referencias

- [1] A. Filho, M. Rodrigues, J. Santos, C. Cunha, and J. a. Donatelli, "Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica Equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel," in *Conference: Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering At: Cartagena das Índias, Colombia*, 11 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bPazB4>
- [2] E. A. Llanes-Cedeño, Y. Guardia-Puebla, A. de la Rosa-Andino, S. Cevallos-Carvajal, and J. C. Rocha-Hoyos, "Detección de fallas en motores de combustión mediante indicadores de temperatura y presión de inyección," *INGENIUS*, no. 22, pp. 38–46, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.04>
- [3] J. D. Ramírez Alzate and A. Arcila Agudelo, *Validación experimental de la relación de compresión para varios combustibles a utilizar en un motor de combustión interna*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3r5PqJ6>

- [4] E. A. Llanes Cedeño, V. D. Zambrano León, A. S. Cevallos Carvajal, E. R. Mena Mena, and J. C. Rocha Hoyos, *Teoría de selección y dimensionamiento del parque automotor*. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3q7pLYI>
- [5] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Balance Energético Nacional 2017*. Gobierno de la República del Ecuador, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/37ZUQOm>
- [6] Erdiwansyah, R. Mamat, M. S. M. Sani, K. Sudhakar, A. Kadarohman, and R. E. Sardjono, “An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 467–479, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.009>
- [7] Y. Li, M. Jia, S. L. Kokjohn, Y. Chang, and R. D. Reitz, “Comprehensive analysis of exergy destruction sources in different engine combustion regimes,” *Energy*, vol. 149, pp. 697–708, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.081>
- [8] P. Tamilselvan, N. Nallusamy, and S. Rajkumar, “A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1134–1159, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176>
- [9] N. Dolatabadi, M. Forder, N. Morris, R. Rahmani, H. Rahnejat, and S. Howell-Smith, “Influence of advanced cylinder coatings on vehicular fuel economy and emissions in piston compression ring conjunction,” *Applied Energy*, vol. 259, p. 114129, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114129>
- [10] E. A. Llanes Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, D. B. Peralta Zurita, and J. C. Leguísamo Milla, “Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador,” *Enfoque UTE*, vol. 9, pp. 149–158, 06 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.201>
- [11] E. Castillo Rivera, L. Mora Díaz, E. Gutiérrez Gualotuña, O. Martínez Valdez, P. Tafur Escanta, A. Soria Amancha, A. Villavicencio Poveda, G. Torres Rodríguez, and R. Baldeón López, “Análisis, estudio y modelamiento matemático para la caracterización energética de las gasolinas comerciales en función de los parámetros de calidad referentes a las normas ASTM,” *Aporte Santiaguino*, no. 1, pp. 122–137, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32911/as.2019.v12.n1.612>
- [12] M. A. William Fernando, C. P. Galarza Valarezo, and A. López Hidalgo, “Evaluación del consumo específico de combustible y emisiones de gases de escape, con el uso del combustible Eco-país en un motor de combustión interna alternativo,” Master’s thesis, Universidad del Azuay – Facultad de Ciencia y Tecnología – Escuela de Ingeniería en Mecánica Automotriz, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kB8dd5>
- [13] M. Mofijur, M. G. Rasul, J. Hyde, and M. M. K. Bhuyia, “Role of Biofuels on IC Engines Emission Reduction,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 886–892, 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.2015.07.211>
- [14] Q. Wang, W. Sun, L. Guo, L. Fan, P. Cheng, H. Zhang, and Y. Sun, “Effects of EGR and combustion phasing on the combustion and emission characteristic of direct-injection CI engine fueled with n-butanol/diesel blends,” *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 364–371, 2019, 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, 13–15 December 2018, Sydney, Australia. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.169>
- [15] X. Wang, B. gang Sun, and Q. he Luo, “Energy and exergy analysis of a turbocharged hydrogen internal combustion engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 11, pp. 5551–5563, 2019, the 6th International Conference on Energy, Engineering and Environmental Engineering. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.047>
- [16] R. Morgan, G. Dong, A. Panesar, and M. Heikal, “A comparative study between a rankine cycle and a novel intra-cycle based waste heat recovery concepts applied to an internal combustion engine,” *Applied Energy*, vol. 174, pp. 108–117, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.026>
- [17] M. Razmara, M. Bidarvatan, M. Shahbakhti, and R. D. Robinett, “Optimal exergy-based control of internal combustion engines,” *Applied Energy*, vol. 183, pp. 1389–1403, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.058>
- [18] K. Venkata Sundar Rao, S. N. Kurbet, and V. V. Kuppast, “A review on performance of the IC engine using alternative fuels,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, Part

- 1, pp. 1989–1996, 2018, international Conference on Processing of Materials, Minerals and Energy (July 29th – 30th) 2016, Ongole, Andhra Pradesh, India. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.303>
- [19] E. A. Llanes-Cedeño, J. B. Carguachi-Caizatoa, and J. C. Rocha-Hoyos, “Evaluación energética y exergética en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6 L,” *Enfoque UTE*, vol. 9, pp. 221–232, 12 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.365>
- [20] P. Sun, Z. Liu, X. Yu, C. Yao, Z. Guo, and S. Yang, “Experimental study on heat and exergy balance of a dual-fuel combined injection engine with hydrogen and gasoline,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 39, pp. 22 301–22 315, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.149>
- [21] C. A. Romero Piedrahita, “Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4923>
- [22] R. Hernandez Sampieri, *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/2O8xoHE>
- [23] J. C. Rocha-Hoyos, L. E. Tipanluisa, V. D. Zambrano, and A. A. Portilla, “Estudio de un motor a gasolina en condiciones de altura con mezclas de aditivo orgánico en el combustible,” *Información tecnológica*, vol. 29, pp. 325–334, 10 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500325>
- [24] Q. he Luo and B. gang Sun, “Experiments on the effect of engine speed, load, equivalence ratio, spark timing and coolant temperature on the energy balance of a turbocharged hydrogen engine,” *Energy Conversion and Management*, vol. 162, pp. 1–12, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.051>
- [25] M. Krishnamoorthi and R. Malayalamurthi, “Availability analysis, performance, combustion and emission behavior of bael oil - diesel - diethyl ether blends in a variable compression ratio diesel engine,” *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 235–252, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.015>
- [26] V. Karthickeyan, “Effect of combustion chamber bowl geometry modification on engine performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engine with its energy and exergy analysis,” *Energy*, vol. 176, pp. 830–852, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.012>
- [27] C. H. Rufino, A. J. T. B. de Lima, A. P. Mattos, F. U. M. Allah, J. L. L. Bernal, J. V. Ferreira, and W. L. R. Gallo, “Exergetic analysis of a spark ignition engine fuelled with ethanol,” *Energy Conversion and Management*, vol. 192, pp. 20–29, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.035>
- [28] INEN, “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos, NTE INEN 2 205:2010,” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana, Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bPTIU1>
- [29] V. Kolanjiappan, “Reduction of amine and biological antioxidants on NOx emissions powered by mango seed biodiesel,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 84, pp. 46–54, Sep. 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.17533/udea.redin.n84a06>
- [30] Y. Guardia-Puebla, J. Márquez-Delgado, V. Sánchez-Girón, E. A. Llanes-Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, and D. B. Peralta-Zurita, “Mejoras a la asignatura diseño estadístico de experimentos para estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica,” *Revista Espacios*, vol. 39, no. 30, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3b5M5UK>
- [31] A. Guzmán, E. Cueva, A. Peralvo, M. Revelo, and A. Armas, “Estudio del rendimiento dinámico de un motor Otto utilizando mezclas de dos tipos de gasolinas Extra y Súper,” *Enfoque UTE*, vol. 9, pp. 208–220, 12 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.335>
- [32] A. I. Quimbata Panchi and E. X. Guallichico Sun-tasig, “Determinación del potencial energético y mecánico del motor Mazda F2 al utilizar los tipos de gasolina comercial empleados en el Ecuador,” Master’s thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kCcddd>
- [33] E. V. Torres González, R. Lugo Leyte, H. D. Lugo Méndez, L. E. Méndez Cruz, J. A. González Andrade, and I. E. Hernández Mora, “Evaluación del desempeño de un motor de gasolina mediante el análisis energético y exergético,” in *Memorias del XXXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Jalisco, México*, 2016, pp. 49–54. [Online]. Available: <https://bit.ly/2NU95NV>

- [34] O. Rosendo Llerena, “Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo,” *INGENIUS*, no. 19, pp. 29–39, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.03>
- [35] A. Erazo, M. Ribeiro Batista, C. E. Tuna, C. L. Vorobieff, and J. Silveira, “Análisis energético, exergético y ecológico aplicado en un motor de combustión interna de pequeño porte accionado con biogas,” in *XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3r6qMs0>



CONVERGENCIA Y MATICES DE LA NEUTRALIDAD EN LA RED EN AMÉRICA DEL SUR

CONVERGENCE AND NUANCES OF NET NEUTRALITY IN SOUTH AMERICA

Roberto D. Triviño^{1,*} , Antonio Franco-Crespo² , Leonardo Ochoa-Urrego³

Recibido: 08-07-2020, Recibido tras revisión: 04-12-2020, Aceptado: 03-02-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

El Internet se ha convertido en la plataforma definitiva para la convergencia, estrechamente asociada con las redes, la tecnología y los medios, debido a su arquitectura abierta y no discriminatoria. La convergencia en las telecomunicaciones es impulsada por ideas, ideologías y políticas de manera progresiva y cíclica, lo que genera más avances tecnológicos, cambios en el mercado, los negocios y las políticas. Como respuesta a la convergencia, la neutralidad en la red busca regular la relación entre los proveedores de servicios de Internet y los usuarios para evitar prácticas discriminatorias y asegurar un Internet abierto como plataforma de innovación, desarrollo económico y acceso a la información para todos. El objetivo de este trabajo es analizar el desarrollo de la convergencia en el sector de las telecomunicaciones y el avance de las políticas de neutralidad en la red en América del Sur, con cinco casos específicos utilizando un enfoque empírico cualitativo. Dentro de los hallazgos, se identifican diferentes enfoques para legislar la neutralidad en la red, controversias sobre los niveles de compromiso con los principios, ambigüedad para la aplicación efectiva de las reglas y acuerdos comerciales que en la práctica violan la neutralidad de la red.

Palabras clave: Internet, neutralidad en la red, convergencia, telecomunicaciones, América del Sur

Abstract

The Internet has become the ultimate platform for convergence, closely associated with network, technology, and media, due to its open and nondiscriminatory architecture. Convergence in telecommunications is propelled by ideas, ideologies, and policies progressively and cyclically, bringing further technological advancement, market, business, and policy changes. As a response to convergence, net neutrality seeks to regulate the relationship between Internet service providers and users to avoid discriminatory practices and ensure the openness of the Internet as a platform for innovation, economic development, and access to information for all. The objective of this work is to analyze the development of convergence in the telecommunications sector and the progress of net neutrality policies in South America, with five specific cases using a qualitative empirical approach. Within the findings, we identify different approaches for legislating net neutrality, controversies concerning the levels of commitment to the principles, ambiguity for effective enforcement of the rules, and commercial arrangements that in practice violate net neutrality.

Keywords: internet, net neutrality, convergence, telecommunications, South America

^{1,*}Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: rdtrivino@espe.edu.ec.

¹Programa de Doctorado en Gestión Tecnológica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

²Facultad de Ciencias Administrativas, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

³Facultad de Ciencias Administrativas, Económicas y Contables, Universidad Central, Bogotá, Colombia.

Forma sugerida de citación: Triviño, R. D.; Franco-Crespo, A. y Ochoa-Urruego, L. (2021). «Convergencia y matices de la neutralidad en la red en América del Sur». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 30-40. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.03>.

1. Introducción

En general, la convergencia se refiere a la tendencia o fenómeno donde dos o más tecnologías, servicios o redes independientes se integran y producen un nuevo resultado [1]. Con frecuencia se piensa en este término como algo nuevo, pero la convergencia regulatoria y tecnológica ha estado presente a lo largo de la historia de las telecomunicaciones. Una discusión aislada de la convergencia en telecomunicaciones es difícil porque está estrechamente asociada con la convergencia tecnológica, de medios y de redes, tal como se muestra en la Figura 1. Por lo tanto, la convergencia en las redes, tecnologías y medios está en la base de cambio en ofertas innovadoras y nuevos modelos de negocios en el sector de las telecomunicaciones; pero también ha sido facilitada por la apertura de los mercados a la competencia, la digitalización de contenido, el surgimiento del protocolo de Internet, y la adopción de la banda ancha de alta velocidad. Esta evolución lleva a que los clásicos ambientes de telecomunicaciones y difusión se muevan hacia un ambiente abierto e integrado de banda ancha programable.



Figura 1. Relaciones entre las convergencias tecnológicas, de medios y de redes [1]

Por otra parte, el creciente rol de la Internet en la economía y la sociedad ha mejorado el proceso de convergencia y su tasa de cambio. Aunque los grandes operadores de telecomunicaciones han tenido un papel en el proceso, nuevos actores del mercado se han movido rápidamente, y con frecuencia de manera impredecible, adoptando diferentes modelos de mercado de empresas de telecomunicaciones tradicionales. Los servicios tradicionales (voz y video) se distribuyen sobre redes IP y el desarrollo de nuevas plataformas facilita la provisión de servicios convergentes. En los últimos años nuevos distribuidores de contenido digital, tales como los proveedores *Over the Top* (OTT) (por ejemplo, Video: Netflix, Amazon video y HBOGo; Audio: Spotify, Deezer; Mensajería: WhatsApp y Line), ahora coexisten y compiten con proveedores tradicionales y operadores de acceso a red, para distribuir contenido y servicios en Internet [2]. Además, un creciente número

de operadores también se están enfocando en contenido móvil para ofrecer música, video o acceso a aplicaciones y servicios en línea desde dispositivos móviles. A menudo, estos cambios ocurren como resultado de un número creciente de usuarios que crean e intercambian sus propios contenidos en múltiples dispositivos.

Hoy en día la convergencia está ocurriendo en América del Sur y pone a prueba a los modelos de negocio tradicionales, genera competencia entre plataformas, coloca presión sobre los operadores tradicionales, cambia el comportamiento y la demanda de servicios del consumidor, llevando a un proceso dinámico de administración de la tecnología. A su vez, estos cambios tecnológicos y de mercado presionan a las agencias reguladoras como un reto para que se adapten al nuevo ambiente convergente de servicios debido a que la relación uno a uno con una entidad reguladora ya no es clara, y puede crearse un nuevo sector donde no se identifique a una entidad reguladora.

En la era de la convergencia y la expansión de los servicios de red, es importante estudiar el impacto de las políticas relacionadas a la Internet. Temas como el acceso universal a los servicios de red, la libertad para comunicarse, la diversidad del mercado de contenidos, la competitividad, la innovación y la promoción de beneficios económicos son grandes preocupaciones que subyacen al debate en el nuevo ambiente en América del Sur.

Por lo tanto, la convergencia creciente entre los sectores de telecomunicaciones, comunicaciones y medios, junto con la posibilidad de (1) transmitir diferentes servicios, contenido y aplicaciones sobre las mismas redes, sin costos importantes para los dueños de la infraestructura, operadores o usuarios, y (2) la transmisión a diferentes tipos de terminales sin privilegiar o discriminar contenidos o formatos, es precisamente la esencia del origen del debate sobre la Neutralidad en la Red (NR) (NN, *Net Neutrality*, por sus siglas en inglés). El término fue introducido por Wu [3] y se refiere al principio de que toda la información en Internet debe tratarse por igual sin ninguna discriminación o restricción, independientemente del origen y el destino, tipo, contenido, dispositivo, servicio, o aplicación [3, 4].

El propósito de las reglas de NR es asegurar que la infraestructura de red sea neutral al prohibir a los proveedores de servicios de Internet (ISP, Internet Service Providers, por sus siglas en inglés) bloquear, reducir la velocidad o priorizar tráfico [3]. Además, las medidas de administración del tráfico deben ser razonables, transparentes, no discriminatorias y proporcionadas, basadas en diferencias técnicas objetivas, de acuerdo con las disposiciones legales en vigor en algunos países [5].

La NR ha surgido como una importante política de convergencia ligada a la innovación tecnológica, al desarrollo económico y al acceso a la información. En

los últimos años, muchos Gobiernos han analizado el rol de los que controlan la infraestructura de acceso y el tráfico en Internet para su beneficio y definieron a la NR de manera diferente en sus políticas, leyes, y regulaciones [6]. El debate se centra en las potenciales consecuencias de que los dueños de la red ejerzan control adicional sobre el tráfico en sus redes [7].

El análisis del debate sobre la NR y el rol de los reguladores ha alcanzado niveles nacionales. Los reguladores de cada país han tomado posiciones variadas acerca de la NR, generando controversias y presiones acerca de lo que debe ser considerado como administración razonable del tráfico en Internet (ITM, *Internet Traffic Management*, por sus siglas en inglés) en un mundo convergente, el tipo de regulación que debe aplicarse y los mecanismos de control para hacer cumplir dicha regulación. Todo esto ha forzado a autoridades gubernamentales a analizar las condiciones ofrecidas por los ISP, las responsabilidades con sus clientes, pero también su derecho a permanecer libre de responsabilidad por el contenido y los servicios que pueden ser considerados ilegales por terceros [8]. Por otra parte, las controversias se concentran en el grado de libertad que un proveedor debe tener para poner en marcha técnicas de ITM, las cuales pueden discriminar información específica sobre sus redes. A pesar de que esto puede parecer un problema meramente técnico, la ITM es más compleja, puede conducir a prácticas discriminatorias, en caso de que los proveedores bloqueen o degraden servicios en línea que compitan con sus servicios. También tiene enormes implicaciones sociales, legales y económicas, que pueden limitar la libertad de expresión, el acceso a la información, la competitividad y la innovación [9].

Los cambios causados por la convergencia no son desconocidos para los países de América del Sur, muchos ya han adoptado leyes que aseguran el principio de la NR. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es discutir el progreso sobre la NR como una política de convergencia y su desarrollo en cinco países sudamericanos, para ver dónde se encuentran en el debate sobre la NR. A pesar de que existen algunos estudios sobre su implementación [9, 10] estos no son completos ni están actualizados. Dado que los Estados deben garantizar la validez de este principio a través de legislación apropiada, se comparan las diferencias entre las regulaciones/leyes en cada uno de los países investigados.

2. Materiales y métodos

Este estudio se basa en un enfoque empírico, en gran medida, basado en herramientas cualitativas para apoyar el seguimiento de las iniciativas de NR en cinco países de Sudamérica. Estos han sido seleccionados con el fin de generar un conjunto enriquecido de hallazgos a partir de un número limitado de casos. La metodología

empleada para la recolección de los datos incluye análisis de documentos e investigación de archivos que comprenden reportes y otros documentos que describen la evolución histórica de la NR; contenido de sitios web y otros documentos relevantes producidos dentro del contexto de cada iniciativa que aquí se estudia. Se utiliza un enfoque cualitativo, porque existe una necesidad de explorar y describir el fenómeno de la convergencia, la NR y el desarrollo del principio en América del Sur.

2.1. La convergencia en las telecomunicaciones

Históricamente, en el mundo tradicional de las telecomunicaciones, distintas redes de comunicación y sus tecnologías subyacentes proporcionaron servicios de voz, datos, radio y televisión. El concepto inicial de las telecomunicaciones, que está basado en telefonía y difusión de video y audio, está siendo reemplazado por un enfoque completamente nuevo donde diferentes tipos de redes separadas para diferentes servicios convergen en una red única.

Hoy en día las redes de comunicación están moviéndose hacia soluciones basadas en IP que, junto con la banda ancha y los desarrollos en dispositivos terminales, permiten el acceso a aplicaciones basadas en IP en una multitud de dispositivos, en un proceso multicapa que puede llamarse convergencia.

Las redes de telecomunicaciones han crecido en el transcurso del último siglo para convertirse en la infraestructura global que es hoy en día. En 2019 existían más de 5,19 millardos de usuarios únicos de teléfonos móviles a nivel mundial, e Internet ha crecido para convertirse también en una infraestructura global de comunicaciones que llega al 59 % de la población mundial (4,54 millardos de personas). Ese mismo año, América del Sur fue la subregión que tuvo la más alta tasa de penetración de Internet, con 73 % de la población teniendo acceso a este servicio [11].

La convergencia entre operadores de telecomunicaciones y proveedores de contenido tradicionales (por ejemplo, *streaming* de audio y video), ha introducido un creciente número de nuevos productos y servicios disponibles, y los usuarios acceden a ellos de acuerdo con sus propias necesidades en cualquier momento y en cualquier lugar. La convergencia está alentando la competencia, movilidad, colaboración, interoperabilidad, creación de contenido e innovación en productos y servicios. Al mismo tiempo, no obstante, plantea nuevos retos a empresas, consumidores y gobernantes, los cuales se agrupan en tres categorías principales: (1) disrupciones de la industria tradicional de las comunicaciones, (2) mayor oferta y nuevas vulnerabilidades para los consumidores, y (3) los límites regulatorios se han hecho menos evidentes.

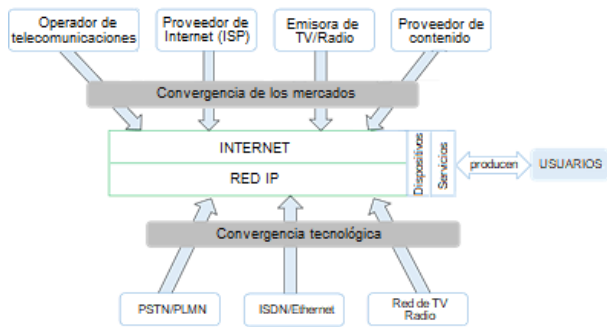


Figura 2. Convergencia de las telecomunicaciones a redes y servicios basados en IP

La digitalización, la innovación tecnológica y la creciente conectividad han fusionado cadenas de valor previamente separadas (por ejemplo, telecomunicaciones/radiodifusión) en cadenas de acceso de valor mixto, las cuales incluyen el servicio de distribución de contenido y los proveedores de dispositivos [12]. La convergencia ha alentado la actualización y recombinación de nuevas configuraciones de productos y servicios y la naturaleza del consumo mediático. Aun así, el surgimiento de los actores OTT tiene profundas implicaciones para las industrias de telecomunicaciones y radiodifusión. Estos nuevos modelos de negocio han eliminado las viejas fronteras entre la conectividad fija/inalámbrica y celular, y entre los servicios de radiodifusión e Internet.

Por otra parte, ahora los usuarios tienen mayor control sobre lo que quieren acceder, dónde y cuándo en Internet. Ellos están tomando un papel más activo, creando sus contenidos y servicios (por ejemplo, utilizando YouTube, Instagram, Twitter o desarrollando aplicaciones). La creciente disponibilidad de banda ancha y convergencia ha resultado en el mercado *on-demand*, el cual está conectando directamente consumidores y productores y personalizando bienes y servicios.

Antes de la convergencia, los reguladores solo debían lidiar con pocos actores tradicionales en sectores específicos, pero ahora se ha eliminado la segmentación tradicional de los servicios de telecomunicaciones, con una cadena de valor más integrada, nuevos participantes y competencia en una escala global; también ha dado lugar a nuevos modelos para contenidos y servicios, donde los usuarios han ganado la capacidad de acceder a ellos en diferentes redes y dispositivos, e interactuar con múltiples proveedores usando Internet, como resultado, existen nuevos actores de diferentes sectores con los que hay que tratar, reduciendo la capacidad de los reguladores de imponer y hacer cumplir regulaciones (ver Figura 2). Esto requiere una revisión del enfoque regulatorio y de los niveles de intervención, junto con mayor coordinación y flexibilidad institucional.

En consecuencia, los cambios en el sector de las telecomunicaciones, particularmente el crecimiento exponencial del tráfico en la red, crean tensiones entre las regulaciones y la oferta competitiva de servicios en ciertos segmentos. En otras palabras, a medida que se incrementa la velocidad de la banda ancha y que las redes adquieren mayor capacidad de ofrecer servicios con valor agregado, las personas encargadas de formular políticas tendrán que repensar sus enfoques tradicionales para manejar asuntos relacionados a, por ejemplo, la adaptación de sus modelos de gestión a las tendencias de la convergencia, el tratamiento de paquetes y ofertas convergentes y la apertura de Internet [12], una función que involucra asegurar la competencia efectiva, administrar los escasos recursos y proteger los derechos de los consumidores.

2.2. Neutralidad en la red

La naturaleza descentralizada de Internet y su apertura a nuevos dispositivos, aplicaciones y servicios tienen un papel importante en el avance de la convergencia y en su éxito en promover el libre flujo de información, innovación, creatividad y crecimiento económico. Esta apertura responde a la interacción e independencia en continua evolución de los diversos componentes técnicos de Internet, que permiten la colaboración e innovación mientras continúan actuando independientemente uno de otro. A nivel internacional, los roles, apertura, y competencias de las múltiples instituciones interesadas que gobiernan los estándares para las diferentes capas de componentes del Internet han servido para expandir las redes descentralizadas que lo constituyen hoy en día. A nivel nacional, también son recomendables los arreglos entre los múltiples interesados para gobernar la Internet. Además, es importante mantener la neutralidad de la tecnología y la calidad apropiada para todas las redes y servicios de banda ancha para asegurar un ambiente de Internet abierto y dinámico [12].

Las redes de banda ancha son una plataforma clave para la innovación, las oportunidades económicas y el compromiso cívico. El punto hasta el cual estas redes están abiertas a facilitar estos objetivos se ha convertido, por tanto, en la principal preocupación de todos los interesados y requiere una revisión del enfoque regulatorio y los niveles de intervención, junto con una mayor coordinación y flexibilidad institucional. En el ambiente cada vez más convergente del presente, los ISP se han convertido en puertas para contenidos y aplicaciones, ya que ellos controlan el acceso final de los proveedores de contenido a los consumidores. En este escenario, la función de los que administran la infraestructura de acceso genera un gran debate en la aplicación de los principios de apertura y no discriminación en el nivel de transporte, y si debe ser o no regulada [7], [13] como un medio para proteger el acceso, la innovación y la competencia en el Internet [14].

Alrededor del mundo, las autoridades gubernamentales han sido forzadas a analizar las condiciones ofrecidas por los ISP y las responsabilidades que ellos tienen con sus clientes y la libre competencia. Por lo tanto, la NR ha avanzado de una propuesta regulatoria frustrada a acción regulatoria actual en varias naciones avanzadas y en desarrollo [15], donde se han incorporado aspectos relacionados no solo con la administración del tráfico, sino también con tópicos tales como la transparencia en la provisión de servicios, el bloqueo de contenido dañino, la protección de los datos, la privacidad y la calidad de servicio. Al respecto, hasta 2015 tanto los marcos regulatorios de la Unión Europea como las reglas del Internet abierto propuestos por la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC, Federal Communications Commission*, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, también han protegido este principio, e indican que la NR es un tema de gran importancia y tiene un amplio ámbito de regulación para garantizar el estado abierto del Internet [8], [16]. Sin embargo, en diciembre de 2017, la FCC votó para derogar las reglas de la NR de 2015. Esta decisión entró en vigor en junio de 2018, dando marcha atrás en las reglas ya logradas sobre: bloqueo, reducción de velocidades y priorización pagada de contenidos.

2.3. Neutralidad en la red en América del Sur

La NR es cada vez más importante a medida que el debate global se identifica y los Gobiernos implementan y revocan regulaciones. Muchos países en América del Sur ya han asumido reglas similares. Estos tienen un porcentaje de penetración de Internet medio o medio-alto, usos variables enfocados en las grandes ciudades, predominio del Internet móvil (dos o más operadores móviles ofreciendo contenido), y proveedores de contenido y aplicaciones (*CAP, Content and Application Providers*, por sus siglas en inglés) cobrados por ISP violando la NR lo cual podría resultar en precios más bajos para los usuarios y una mayor adopción de aplicaciones y servicios de Internet [17].

Dada la convergencia multicapas de redes y servicios, las personas encargadas de formular políticas en América del Sur podrían tener incentivos para aplicar diversas reglas cuando es una prioridad incrementar el acceso. Por lo tanto, ellos están reconsiderando sus políticas y marcos regulatorios para ajustarlos a desarrollos actuales y futuros, y parecen estar inclinados a principios de diseño para asegurar la NR. En base a las razones dadas por los países que inicialmente abordaron este tema, se ve a la NR como esencial para estimular la competencia, promover la innovación y asegurar que los consumidores puedan acceder a cualquier contenido o servicio legal proporcionado en el Internet [18]. Al respecto de inconvenientes sobre la NR en América del Sur, nos concentramos en cinco países. De forma notable, Argentina, Chile, Brasil, Colom-

bia y Ecuador han tomado decisiones para prohibir el bloqueo, la reducción de velocidad y la priorización pagada de contenidos, por parte de los ISP; mientras otros están realizando consultas o todavía debatiendo sobre el tema [12].

2.3.1. Chile

En 2010, Chile estuvo entre los primeros países en promulgar una ley específica para proteger la NR. La Ley de la Neutralidad en la Red, Ley N.º 20.453/2010, especifica el principio de la NR y sus excepciones en el artículo 24H, párrafo A, que (1) promueve la transparencia al pedir la publicación de las características del acceso a Internet, velocidad y calidad; (2) garantiza el servicio; y (3) prohíbe bloquear, interferir, discriminar o alterar cualquier contenido, aplicación o servicio legal [15]. En este sentido, los ISP deben ofrecer a cada usuario conectividad y acceso a Internet sin distinguir arbitrariamente contenido o aplicaciones según la fuente o el propietario, considerando las diferentes configuraciones en los contratos de acceso [9], [19].

La ley adopta una visión flexible de la discriminación del tráfico, dejando que los proveedores tomen acción para administrar la red y el tráfico, pero sin afectar la libre competencia. En 2013, la Secretaría del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (SUBTEL), promulgó el Decreto 368 [20] que prohíbe el bloqueo arbitrario del contenido de Internet, pero de acuerdo con el artículo 7, la gestión del tráfico está regulada, pero no prohibida [9]. Los ISP solo pueden afectar la calidad o ejecutar acciones para la gestión del tráfico y la administración de la red, siempre que esas acciones no afecten la libre competencia, la privacidad y que sea informado a través de una publicación clara.

Es importante mencionar que, a pesar de la existencia de la ley y el decreto, desde 2013 varias compañías de telecomunicaciones fueron acusadas por organizaciones civiles de reducir la velocidad de aplicaciones y contenidos específicos, sin justificar estas prácticas [9]. Existe evidencia de la ausencia de control de las obligaciones desde la ley, debido a la falta de capacidad técnica o de voluntad política [21]. En contraparte, en un reporte de 2015 se presentaron estadísticas acerca del nivel de su cumplimiento [22]; dicho reporte mostró alrededor de cuarenta cargos entre 2011 y 2015, pero no indicó a qué tipo de incumplimiento se refieren [19].

En años recientes se mantienen los problemas de no observancia [23], especialmente con operadores móviles que ofrecen acceso a aplicaciones específicas y contenidos con costo cero (*ZR, Zero Rating*, por sus siglas en inglés), como una estrategia de ventas. Para proveedores de contenido, estas estrategias socavan la libre competencia y la NR, sin embargo, los agentes regulatorios mencionan que los aspectos comerciales tales como las ofertas ZR no distinguen contenidos arbitrariamente, según la fuente o el propietario y, por lo

tanto, no aplican discriminación dado que los usuarios todavía pueden acceder a contenido e Internet. Esta interpretación parece favorecer la idea de que los aspectos técnicos deben cumplir con la ley y, por el contrario, los aspectos comerciales estarían fuera del alcance de las obligaciones [19]. Entonces, la SUBTEL solo pide a las compañías de telecomunicaciones y a los ISP eliminar de sus planes el llamado acceso gratis a aplicaciones y contenido [23, 24].

Desde 2018, basándose en el retroceso de las reglas de la NR en Estados Unidos, el debate continúa y la SUBTEL ha establecido grupos de trabajo con los múltiples interesados para analizar los servicios ZR y OTT y las implicaciones de la decisión estadounidense considerando que es una potencia en términos de generación de contenido, así como también aloja el del 80 % de la información y los datos mundiales [24, 25].

2.3.2. Colombia

La legislación que aborda la NR está contenida en el artículo 56 de la Ley N.º 1450, Capítulo II y establece que los ISP no pueden bloquear, interferir con, discriminar a, o restringir el derecho de cualquier usuario de Internet a utilizar, enviar, recibir u ofrecer cualquier contenido, aplicación o servicio lícito en el Internet [9], [15] independientemente del origen o del propietario. La ley también establece formas de hacer ofertas de acuerdo con las necesidades de los segmentos de mercado, según los perfiles de uso y consumo de los usuarios, y esto no debe ser entendido como discriminación. Otros aspectos especifican el derecho de los usuarios a (1) utilizar en la red cualquier clase de dispositivos legales; (2) que le sean ofrecidos servicios de control parental para el contenido que viole la ley; (3) la transparencia de la información acerca de las características y garantías del servicio; (4) tener mecanismos para preservar la privacidad de los usuarios contra virus y seguridad de red; y solo bloquear acceso a contenido específico tras requerimiento expreso del usuario [26].

Además de la ley, la Resolución 3502 del regulador de Colombia aprobada en 2011, generó críticas de los usuarios, expertos y organizaciones cívicas que encontraron imprecisiones, vacíos y ambigüedades que podrían dar a los operadores una manera de eludir ciertos aspectos de la NR. Para algunos críticos [27] las controversias en ese proceso se debieron a la ausencia de participación de la sociedad civil y la academia y, por lo tanto, la visión de los operadores tuvo influencia en su desarrollo. La misma resolución permite a los proveedores ofrecer servicios de acceso a Internet por un precio según las necesidades del mercado, esto es, ofrecer planes basados en contenido y aplicaciones que los ISP quieren ofrecer, a través de terceros, ZR o integración vertical. También permite la implementación de una administración de tráfico razonable

y no discriminatoria estableciendo niveles de calidad de servicios (*QoS*, *Quality of Services*, por sus siglas en inglés), y priorizar los tipos de tráfico de acuerdo con la latencia y el retardo para el acceso a Internet, y aclara las condiciones para el bloqueo de contenido por razones de seguridad, los cuales cumplan los requerimientos técnicos o estándares adoptados [28], aspectos prohibidos o controlados en otras leyes de NR [29].

La excepción en los planes de Internet limitados por contenido hace a la misma resolución no fiel, ambigua y directamente contradictoria de la ley, dado que limitar contenido, aplicaciones o servicios de acuerdo con tratos de mercado o perfiles de consumo es discriminar o priorizar la información, y poner a disposición una «Internet reducida» [19], [27]. Finalmente, la Resolución 3502 regula la relación de los consumidores con los ISP, pero no con los proveedores de contenido o aplicaciones [15].

El Ministerio colombiano de ICT comenzó en 2016 a hacer consultas a los múltiples interesados para desarrollar una nueva política y marco regulatorio para las telecomunicaciones y la radiodifusión, con el fin de abordar la convergencia en los mercados de las comunicaciones [9]. Hoy en día, Colombia ha formulado el proyecto El papel de los servicios OTT dentro de las iniciativas de la Agenda Regulatoria 2018-2019 para revisar las tendencias regulatorias para la economía digital, donde se debe analizar y complementar el marco regulatorio sobre la NR que permita ofertas y precios de mercado orientados a costos, protección de los intereses de los consumidores, así como a actualizar las condiciones de la licencia de operación de los operadores y proveedores de servicios existentes [30].

2.3.3. Brasil

En 2014, luego de casi cinco años de debate, el Congreso brasileño aprobó el Marco Civil da Internet (MCI), Ley N.º 12.965/2014, la cual, además de consolidar derechos, deberes y principios para el uso y desarrollo del Internet en Brasil, consagró el principio de la NR y la privacidad de los usuarios de Internet [8]. Su importancia radica no solo en sus principios, sino también en la manera en que fue redactada, de acuerdo con un proceso de consulta abierto, público y colaborativo, implementado a lo largo del país que ayudó a construir el texto de la ley.

La ley establece (1) la transparencia de la información, al pedir a los proveedores información clara y completa sobre los contratos de servicio, incluyendo detalles de la protección de los datos, mitigación y administración de la red; (2) el no bloqueo, al afirmar que los proveedores deben tratar, de manera isonómica cualquier paquete de datos, independientemente del contenido, origen y destino, servicio, terminal o aplicación; y (3) las prácticas anticompetitivas, al ofrecer servicios en condiciones comerciales no discriminatorias [15].

La ley continúa sobre la prohibición de la discriminación o degradación del tráfico, que solo puede ser implementada como resultado de requerimientos técnicos esenciales, y priorización de servicios de emergencia. El Decreto N.º 8.771/2016 define los «requerimientos técnicos esenciales» como temas de seguridad de red, y situaciones excepcionales de congestión o interrupción; mientras que los «servicios de emergencia» están definidos como comunicaciones destinadas a los proveedores de servicios de emergencia, o comunicaciones para informar a la población en situaciones de desastre, riesgo de emergencia o estado de calamidad pública [31]. El Decreto también buscaba regular que las relaciones comerciales entre el operador de la infraestructura (*IO, infrastructure operator*, por sus siglas en inglés) y los actores de la capa lógica no puedan «comprometer el carácter público y sin restricciones del acceso a Internet», «priorizar paquetes de datos debido a arreglos comerciales» o privilegiar aplicaciones ofrecidas por el IO [19].

El MCI es considerada una de las leyes más avanzadas en el mundo y demuestra un gran esfuerzo para adaptar derechos y libertades fundamentales al mundo digital, incorporando aspectos para eliminar ambigüedades y violaciones hacia la NR que tienen el potencial de parar la innovación y la competencia. Como una novedad, el decreto prohíbe estrategias ZR, incluye un sistema tripartito para supervisar y determina que las empresas de contenido deben tener oficinas legales en Brasil [32]. Sin embargo, cuando en 2018, las asociaciones de consumidores y otras organizaciones de la sociedad civil evaluaron las prácticas ZR como negativas y afirmaban que violaban la NR, los operadores privados y agentes regulatorios afirmaron que la NR fue limitada específicamente al nivel lógico e infraestructura del Internet, por lo que las prácticas de mercado no violan la NR [33], [34].

2.3.4. Ecuador

La nueva Ley de Telecomunicaciones en Ecuador (LOT), promulgada en 2015, abarca las oportunidades de convergencia y estipula en su artículo 12 que el Estado «impulsará el establecimiento y explotación de redes y servicios de telecomunicaciones que promuevan la convergencia de servicios, en conformidad con los intereses públicos y con las disposiciones de la ley y su normativa» [12], [15]; también incluye cláusulas que abordan específicamente la NR y su promoción (artículos 3 y 4); y los derechos que tienen suscriptores, clientes y usuarios de los servicios de telecomunicaciones, indicando que ellos pueden acceder a cualquier aplicación o servicio permitido disponible en la red (artículo 22).

La ley prohíbe bloquear, reducir la velocidad, priorizar o restringir el derecho del usuario a utilizar, enviar, recibir u ofrecer cualquier contenido, aplicaciones o

servicios legales a través del Internet, sus redes u otras tecnologías TIC. Asimismo, prohíbe limitar el derecho de incorporar o utilizar cualquier clase de equipo o dispositivo en la red, siempre que sea legal, excepto para casos establecidos bajo el marco legal y aquellos en los que la autoridad competente decida, o cuando el cliente, suscriptor o usuario demande expresamente la limitación o bloqueo del contenido. Se permite a los proveedores realizar acciones técnicas para administrar sus redes cuando consideren necesario, y dentro del alcance exclusivo de sus actividades para garantizar la provisión del servicio [35].

De acuerdo con esta ley, el cuerpo regulador AR-COTEL será responsable de las regulaciones y normas que permitan la provisión de múltiples servicios en la misma red para impulsar, de manera efectiva, la convergencia de servicios y asistir con el desarrollo tecnológico en el país, siguiendo el principio de la NR [12]. Sin embargo, la LOT tiene omisiones tales como: no define qué es la NR, usando el concepto emitido por la ITU, que es ambiguo y no muy aplicable. También ignora el significado del principio y permite el Art. 66 de la ley, en el cual los proveedores de servicios establecen «planes de tarifas constituidos por unos o varios servicios o productos de servicios». Además, a diferencia de la política que previamente definía la NR (TEL-477-16) [36], que incluía los conceptos de no discriminación, estos no han sido incluidos; todos esos aspectos violan la NR y dejan a los usuarios indefensos contra los potenciales abusos de los proveedores [37]. Como ejemplo, hubo una demanda contra los operadores móviles por ofrecer servicios ilimitados y gratis de WhatsApp, pero estas ofertas no incluían la funcionalidad de llamadas de voz que está normalmente integrada. Con respecto a esta situación, el ministro de Telecomunicaciones indicó que esta práctica de no incluir esa función en los paquetes ZR de WhatsApp iba en contra del principio de la NR e investigará los hechos y tomará acciones [38]. Sin embargo, hoy en día los operadores móviles todavía ofrecen uso ilimitado de algunos servicios y ciertas aplicaciones junto con sus planes de datos limitados.

2.3.5. Argentina

En 2014 fue aprobada la Ley 27.078 «Ley Argentina Digital», esta nueva norma gobierna las telecomunicaciones en el país y sustituye la Ley Nacional de Telecomunicaciones 19.798/72 y el Decreto 764/00 [33], [39]. Esta fue una actualización importante y estableció que el Estado debe asegurar calidad, accesibilidad y asequibilidad al Internet. También debe garantizar los servicios TIC y asegurar sus condiciones de calidad, asequibilidad a precios justos y razonables, fomentando la competencia entre los proveedores de servicio de forma que los consumidores puedan escoger el mejor de ellos. El artículo 1 establece y garantiza la NR como un obje-

tivo, mientras que el artículo 56 establece los derechos de los usuarios a acceder, usar, enviar, recibir u ofrecer cualquier contenido, aplicación, servicio o protocolo sin ninguna restricción, discriminación, distinción, bloqueo, interferencia, obstrucción o degradación [40]. El Artículo 57 prohíbe a los operadores TIC (1) bloquear o discriminar acceso o uso de cualquier contenido, aplicación o servicio excepto por orden de una corte; (2) establecer el precio del acceso a Internet en virtud de su contenido, servicios o aplicaciones; y (3) limitar arbitrariamente el derecho del usuario a utilizar cualquier *hardware* o *software* para acceder al Internet, siempre que esas acciones no afecten o dañen la red.

A pesar de que la ley fue modificada en 2015 por el Decreto de Necesidad y Urgencia 267/2015, los cambios no modificaron las provisiones de los artículos 56 y 57 acerca de la NR. Sin embargo, generó controversias y críticas, debido a que la misma ley asegura los servicios TIC que en la práctica deben ser aplicados a proveedores de Internet, contenido y aplicaciones, pero en su desglose, parece referirse solamente a ISP. Asimismo, no se especifican ni los aspectos de tarifa cero ni los procedimientos para asegurar la NR [11], temas que socavan la libre competencia.

Desde 2017 los operadores móviles han estado ofreciendo tráfico gratis para algunas aplicaciones y servicios; dentro de esta estrategia los proveedores pagan servicios de terceros para posicionar su oferta, y uno de ellos, integrado verticalmente, favoreció su contenido. Esta práctica es un obstáculo para otras aplicaciones existentes ya que crea una barrera para la entrada de nuevos servicios, afectando la competencia y la innovación [40]. Finalmente, es importante notar que en 2018 hubo una demanda entre operadores afirmando que una aplicación ZR de video de uno de ellos, durante la Copa Mundial de Fútbol, violó la NR. El agente regulatorio concluyó que la promoción de esa aplicación era tolerable siempre que también fuese aplicada a otras aplicaciones similares [40]. Esto implica que el regulador argentino no es independiente o imparcial, sino es más bien permeable a intereses y competencia de compañías.

3. Resultados y discusión

La NR es un ejemplo de una respuesta a la convergencia ya que es un principio para regular la relación entre ISP y usuarios para evitar prácticas discriminatorias sobre servicios y aplicaciones. A pesar de que se han introducido regulaciones/leyes relacionadas con la NR en América del Sur, su implementación puede variar para redes fijas o móviles. La Tabla 1 muestra la lista de diferencias entre las regulaciones/leyes en los cinco países.

La revisión muestra que las diferentes reglas en América del Sur se enfocan en acceso, transparencia de la información, no discriminación arbitraria de con-

tenidos o servicios, y las excepciones al principio. Sin embargo, la mayor parte del tiempo, las prácticas de ITM o los términos de servicio no están claros, como se menciona en [23], [36].

Tabla 1. Comparación de políticas entre países

Artículo	Países				
	CH	BR	CO	EC	AR
Definición y conceptos de la NR	•	•	–	–	–
Garantías para acceso/uso de servicios/contenido	•	•	•	•	•
Prohíbe bloquear o discriminar acceso/uso	•	•	•	•	•
Transparencia de la información	•	•	•	•	•
Uso de HW para acceso	•	•	•	•	•
Establece precio por contenido, servicio o mercado	–	▲	•	•	▲
Implementa técnicas ITM	•	▲	•	•	•
Excepciones (requerimientos técnicos, emergencia)	–	•	–	–	–
Tarifa cero	▲	▲	–	–	–
Control de las obligaciones	•	•	–	–	•

• Especificado, – No especificado, ▲ Prohibido

Se permite la integración de múltiples dispositivos legales en la red siempre que ellos no afecten su calidad. Sin embargo, las leyes buscan establecer excepciones para permitir ITM y QoS a los usuarios, pendiente entre criterios de razonabilidad y excepciones colocadas explícitamente en las políticas. Por lo tanto, permiten a los ISP interferir arbitrariamente con el tráfico de Internet y discriminar o aún bloquear nuevos servicios o plataformas (Industria 4.0, OTT o dispositivos IoT) por razones comerciales o técnicas. Por lo tanto, las prácticas de ITM deben ser transparentes ya que pueden afectar significativamente a los usuarios finales [41].

El nivel de cumplimiento de las leyes tiene problemas de transgresiones repetitivas [22]. El ZR es un ejemplo de cómo la NR puede ser afectada, especialmente en el servicio de Internet móvil, a través del cual las compañías ofrecen acceso a aplicaciones específicas sin constituir un gasto en el plan de datos del usuario [42]. Dado que no es posible hacer esto sin la necesaria discriminación de datos según el origen, destino o contenido, esta práctica actúa contra los principios básicos de la NR [33], [38]. Estos planes son ofrecidos en los cinco países analizados, creando

consumidores cautivos, aun cuando en algunos de ellos, esta práctica está prohibida [34], [42].

4. Conclusiones

Actualmente la convergencia desempeña un papel importante en la sociedad. Puede influir en cómo los Gobiernos desarrollan políticas apropiadas mientras buscan el bienestar social y la competencia entre empresas con nuevos productos y servicios con valor agregado. Sin embargo, la convergencia ha planteado distintos temas como interoperabilidad, interconexión, neutralidad, políticas y marco regulatorio, protección de los derechos del consumidor y acceso universal sin discriminación.

A pesar de que en América del Sur cada nación tiene una necesidad de mercado específica que abordar, ellas deben adaptarse. Se identificó que los cinco países muestran diferentes enfoques para legislar sobre la NR y ofrecen la oportunidad de examinar la relación entre las formas de legislación sobre la misma y la medida en la que puede ser comprometido por decisiones de administración de tráfico o aspectos comerciales (por ejemplo, el ZR).

En teoría, el ZR constituye una violación de la NR. Por ende, el ZR también puede impedir la innovación, competencia y libre expresión. Aun cuando podría ayudar a superar las barreras de costos para alcanzar la valiosa meta de incrementar la penetración de Internet en la región, también podría encerrar a los usuarios en «jardines vallados» de contenido. Por lo tanto, las agencias regulatorias deben ser cuidadosas en diseñar cualquier arreglo comercial, de manera que se asegure la menor intrusión posible dentro del principio de precios no discriminatorios. Por otra parte, este tópico particular dentro de la NR representa un reto complejo de políticas públicas y necesita más investigación en la región.

Finalmente, el desarrollo de los enfoques para implementar el principio de la NR y el número de naciones adoptando este principio confirma su importancia. Con respecto a las limitaciones de esta investigación, la información sobre las políticas de NR en los cinco países aquí examinados representa una foto en tiempo y, en consecuencia, el conocimiento disponible está restringido. Se necesitan estudios longitudinales para evaluar el impacto de las reglas de la NR en el acceso, innovación y competencia a lo largo del tiempo. También se requieren estudios en prácticas ITM que deben ser transparentes, independientemente de las regulaciones, y estudios a gran escala que sondeen los hábitos de los usuarios del Internet móvil. Estos nos ayudarían a entender mejor los efectos de las reglas de la NR, las prácticas ZR, los patrones de uso del Internet, y proponer un nuevo enfoque regulatorio en la región.

Referencias

- [1] S. E. Park, “Technological convergence: Regulatory, digital privacy, and data security issues,” Congressional Research Service, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/306086z>
- [2] M. Gendler, “Neutralidad de la red y servicios over the top: una compleja relación en el ecosistema de telecomunicaciones,” *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, vol. 0, no. 17, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.32870/Pk.a9n17.362>
- [3] T. Wu, “Network neutrality, broadband discrimination,” *Journal on Telecommunications and High Technology Law*, vol. 2, no. 1, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rqaES0>
- [4] ITU, “Trends in telecommunication reform,” International Telecommunication Union (ITU), Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bVcbct>
- [5] V. Stocker, G. Smaragdakis, and W. Lehr, “The state of network neutrality regulation,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 50, no. 1, pp. 45–59, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3390251.3390258>
- [6] J. Barata Mir, “El concepto de *net neutrality* y la tensión entre regulación pública y autorregulación privada de las redes,” *IDP. Revista de Internet, Derecho y Política*, no. 13, pp. 44–52, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e62Ykk>
- [7] J. Krämer, L. Wiewiorra, and C. Weinhardt, “Net neutrality: A progress report,” *Telecommunications Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 794–813, 2013, papers from the 40th Research Conference on Communication, Information and Internet Policy (TPRC 2012) Special issue on the first papers from the ‘Mapping the Field’ initiative. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2012.08.005>
- [8] European Union, *Official Journal of the European Union L 310*, 2015, vol. 58. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qaPAgX>
- [9] P. A. Vargas-Leon, *Net Neutrality: An Overview of Enacted Laws in South America*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 109–126. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26425-7_10
- [10] O. V. Carboni and C. Labate, “América latina por uma rede neutral: o princípio da neutralidade em Chile e Brasil,” *Revista FAMECOS*, vol. 25, no. 2, p. ID28507, abr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15448/1980-3729.2018.2.28507>

- [11] We are social. (2020) DIGITAL 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Ohytgu>
- [12] OECD and IDB, *Broadband Policies for Latin America and the Caribbean: A Digital Economy Toolkit*. OECD Publishing, Paris, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264251823-en>
- [13] R. Hahn and W. Scott, "The economics of net neutrality," *The Economists' Voice*, vol. 3, no. 6, pp. 1–7, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bW0bHL>
- [14] B. Van Schewick, *Internet Architecture and Innovation*. MIT Press, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kI8xqd>
- [15] R. Triviño, A. Franco, and L. Ochoa, "Net neutrality regulation in south america: A progress review," *Latin-American Journal of Computing - LAJC*, vol. 6, no. 1, pp. 17–26, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uPQzXF>
- [16] FCC. (2015) Open internet advisory committee. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PvLrrw>
- [17] G. Robb and R. Hawthorne, "Net neutrality and market power: The case of south africa," *Telecommunications Policy*, vol. 43, no. 9, p. 101814, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.03.003>
- [18] M. Zukerfeld and B. Califano, "Discutiendo la neutralidad de la red: de los discursos dominantes a las prácticas en contextos periféricos / Debating Net Neutrality: From dominant discourses to practices in peripheral contexts," *Commons. Revista de Comunicación y Ciudadanía Digital*, vol. 8, no. 1, pp. 5–43, jun. 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.25267/COMMON.2019.v8.i1.01>
- [19] P. Viollier, O. Castro, C. Brito, and S. Pereira da Silva, *Neutralidad de red en América Latina: Reglamentación, aplicación de la ley y perspectivas*. Derechos Digitales América Latina, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bZ15TJ>
- [20] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, *Reglamento que regula las características y condiciones de la neutralidad de la red en el servicio de acceso a internet*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Santiago de Chile, Chile, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3uL3fyS>
- [21] J. Huerta, "La neutralidad de la red en Chile: ¿mucho sofisticación para la SUBTEL?" *Digital Rights Latin American and the Caribbean*, no. 30, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/30aO9ow>
- [22] P. Huichalaf. (2015) La neutralidad de la red: El caso chileno. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e8gJz0>
- [23] R. Layton, "Which open internet framework is best for mobile app innovation?: An empirical inquiry of net neutrality rules around the world," Ph.D. dissertation, 2017, PhD supervisor: Prof. Knud Erik Skouby, Aalborg University, Denmark. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5278/vbn.phd.engsci.00181>
- [24] M. Correa Pérez, "Zero-rating y la neutralidad de la red en Chile," *Revista chilena de derecho y tecnología*, vol. 7, pp. 107–135, 06 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5354/0719-2584.2018.48961>
- [25] SUBTEL. (2017) Subtel establece mesa de trabajo para analizar implicancias del fin de la neutralidad de red en EE. UU. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bZkT9B>
- [26] Congreso de la República de Colombia, *Plan Nacional de Desarrollo: 2010-2014. Todos por un nuevo país*. Departamento Nacional de Planeación, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e38BQd>
- [27] Fundación karisma, *¿Cómo se contrata en América Latina el acceso a Internet y qué tiene que ver con la neutralidad de la red?* Fundación Karisma, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sM0yv5>
- [28] Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2011) Neutralidad en internet. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qlKFf5>
- [29] J. Casasbuenas G. (2016) Neutralidad en internet: Factor que potencia el cierre de la brecha social digital. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bbtE1a>
- [30] Comisión de Regulación de Comunicaciones, *El rol de los servicios OTT en el sector de las comunicaciones en Colombia, impactos y perspectivas regulatorias*. Comisión de Regulación de Comunicaciones, República de Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qdyZt7>
- [31] Camara dos Deputados. (2016) Legislação informatizada - decreto n 8.771, de 11 de maio de 2016 - publicação original. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bfBZke>
- [32] O. V. Carboni and C. Labate, "América latina por uma rede neutral: o principio da neutralidade em chile e brasil," *Revista FAMECOS*, vol. 25, no. 2, p. ID28507, abr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15448/1980-3729.2018.2.28507>

- [33] UNESCO, *Assessing Internet Development in Brazil. Using UNESCO's Internet Universality ROAM-X Indicators*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2O2X74q>
- [34] J. Omari, “Is facebook the internet? ethnographic perspectives on open internet governance in brazil,” *Law & Social Inquiry*, vol. 45, no. 4, pp. 1093–1112, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/lsi.2020.5>
- [35] Asamblea Nacional, *Ley orgánica de Telecomunicaciones*. Asamblea Nacional de la República del Ecuador, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rlrFgw>
- [36] B. Califano, “Políticas de internet: la neutralidad de la red y los desafíos para su regulación,” *Revista Eptic*, vol. 15, no. 3, pp. 19–37, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3kJCLcx>
- [37] A. Delgado. (2015) Ecuador: la ley de telecomunicaciones afecta la neutralidad de la red. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bg5a6P>
- [38] A. J. Carrillo, *Protección a la neutralidad de la red en Ecuador*, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3riDvYG>
- [39] M. A. Gendler, “La neutralidad de la red: Debates y acciones en argentina,” in *XXXI Congreso ALAS Uruguay 2017. Las encrucijadas de América Latina. La sociología en tiempos de cambio*, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2PzdNBb>
- [40] L. Enzo Lufrano, “El primero te lo regalan: zero-rating de las operadoras móviles de la Argentina,” *Revista Questión*, vol. 1, no. 62, p. e163, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24215/16696581e163>
- [41] T. Garrett, L. E. Setenareski, L. M. Peres, L. C. E. Bona, and E. P. Duarte, “Monitoring network neutrality: A survey on traffic differentiation detection,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2486–2517, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2812641>
- [42] G. T. Hoskins, “Beyond zero sum: the case for context in regulating zero rating in the global south,” *Internet Policy Review*, vol. 8, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14763/2019.1.1392>



APOYO A LOS SUBSISTEMAS DE TALENTO HUMANO, SELECCIÓN Y RECLUTAMIENTO A PARTIR DE UN SISTEMA EXPERTO. CASO DE ESTUDIO

SUPPORT TO THE HUMAN TALENT SUBSYSTEMS, SELECTION AND RECRUITMENT FROM AN EXPERT SYSTEM. CASE STUDY

Karina Matute-Pinos^{1,*} Rodolfo Bojorque-Chasi²

Recibido: 10-11-2020, Recibido tras revisión: 04-02-2021, Aceptado: 25-02-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

La gestión de talento humano es un factor fundamental en el éxito de las organizaciones. La inclusión en el entorno laboral de las personas con discapacidad ha ayudado a potenciar sus cualidades y a aprovechar su talento. Muchos de los sistemas de gestión de talento humano carecen de directrices para el reclutamiento y selección de una persona con discapacidad, es por eso por lo que el presente trabajo muestra el estudio realizado a estos dos procesos indicando los factores que influyen en la asignación o no de un cargo, donde de cada candidato es considerando el nivel y tipo de discapacidad, nivel de estudios, experiencia, capacitación entre otros aspectos, enfocándose en la tarea de aplicar técnicas de aprendizaje supervisado que permitan clasificar a un candidato con discapacidad para un puesto de trabajo como apto o no y técnicas de aprendizaje no supervisado como el *clustering* que ayuda a definir patrones ocultos en los datos si los hubiera. El resultado obtenido del estudio presenta varias técnicas de clasificación y la selección de la más adecuada para el conjunto de datos en cuestión, igualmente mediante técnicas de aprendizaje no supervisado se determina cuántos clústeres representativos se identifican en los datos. No se busca que se integren las personas a través de las discapacidades, sino todo lo contrario, que se integren las personas por medio de la potencialidad de todas sus capacidades.

Palabras clave: aprendizaje automático, inteligencia artificial, minería de datos, sistemas expertos

Abstract

Human talent management is a key factor in the success of organizations. The inclusion of people with disabilities in the work environment has helped to enhance their qualities and harness their talent. Many of the human talent management systems lack guidelines for the recruitment and selection of a person with a disability, this is why this work shows the study carried out on these two processes indicating the factors that influence the allocation or not of a position, where for each candidate it is considered the level and type of disability, level of education, experience, training among other aspects, focusing on the task of applying supervised learning techniques that enable us to classify a candidate with a disability as suitable or not for a job, and unsupervised learning techniques such as clustering that helps us define hidden patterns in the data, if any. The result obtained from the study presents some classifications techniques and the selection of the most appropriate one for the available dataset. It is not sought to integrate people through their disabilities, but quite the opposite, to integrate people based on the potential of all their abilities.

Keywords: automatic learning, artificial intelligence, data mining, expert systems

^{1,*}Maestría en Administración de Empresas, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: kmatute@est.ups.edu.ec.

²Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1. Introducción

En los últimos años distintos organismos y Gobiernos han considerado como punto importante en su gestión el mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad, tal es el ejemplo del Gobierno de Ecuador que dentro de su Plan de Desarrollo señala como una de sus metas «Aumentar el número de personas con discapacidad y/o sustitutos insertados en el sistema laboral a 2021» [1] y es así que apoyado en la Constitución vigente, Código de Trabajo y Ley Orgánica de Discapacidades se ha logrado una integración que contribuye a la inclusión de personas con discapacidad en la sociedad. En el ámbito laboral se han creado paulatinamente mecanismos de selección en dónde se han adecuado los procesos permitiendo así la participación de personas con discapacidad procurando la equidad de género y la diversidad de discapacidad [2].

Los datos de recursos humanos proporcionan una fuente valiosa de información para el descubrimiento de conocimiento y el desarrollo de sistemas de ayuda a la toma de decisiones al momento de reclutar al personal. Hoy en día, las organizaciones tienen que luchar eficazmente en términos de costo, calidad, servicio e innovación.

El éxito de estas tareas depende de disponer de suficientes personas adecuadas con las habilidades adecuadas, desplegadas en los lugares apropiados en el momento adecuado, lo que se conoce como gestión del talento humano. Gestionar el talento de una organización se ha convertido en un desafío para los profesionales de recursos humanos, esta tarea implica muchas decisiones administrativas para elegir a la persona correcta para el trabajo correcto en el momento correcto.

A veces, este tipo de decisiones son muy inciertas y difíciles; y depende de varios factores, como la experiencia humana, el conocimiento, la preferencia y el juicio [3]. El talento se considera la capacidad de cualquier individuo para marcar una diferencia significativa en el desempeño actual y futuro de la organización [4].

El reclutamiento se dificulta cuando se analiza el proceso de inclusión laboral a personas con discapacidad. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualmente en los países en desarrollo entre el 90 % y 80 % de las personas con discapacidad en edad para trabajar están desempleadas, en los países industrializados la estimación es entre el 50 % y 70 %.

Las barreras para la entrada al mercado laboral de las personas con discapacidad varían según el tipo de discapacidad, por lo que, en el proceso de inserción laboral de una persona con discapacidad, se requiere tomar medidas que garanticen el acceso y la permanencia de esta persona en su lugar de trabajo, respetando su individualidad y su tipo de discapacidad [5]. Cuando un candidato cumpla con el perfil adecuado para un

cargo, la empresa debería gestionar y realizar los cambios necesarios al lugar de trabajo, ayudando así a desarrollar las capacidades de esta persona.

En el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades del Ecuador se encuentran registradas [6] a junio del 2020, 481 392 personas con discapacidad de las cuales el 13 % se encuentran laboralmente activas sin considerar sustitutos, de estas el 56,20 % posee discapacidad física, seguida por discapacidad auditiva 17,12 %, discapacidad visual un 14,31 %, discapacidad intelectual 8,88 % y, finalmente, discapacidad psicosocial con un 3,50 %. El sector privado tiene en su nómina a 46 496 personas con discapacidad y el sector público 18 333 personas. Ver Figura 1.

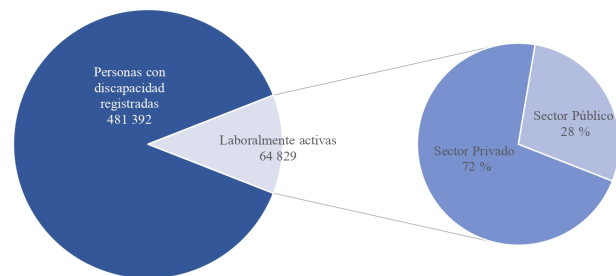


Figura 1. Personas con discapacidad registradas en el CONADIS

Según [7], el proceso de reclutamiento ha mejorado mediante la implementación de tecnologías de información, que permiten simplificar el proceso de publicar vacantes y hojas de vida, enumerar trabajos y ver posibles candidatos. Sin embargo, el proceso de reclutamiento sigue siendo imperfecto y el estudio menciona tres razones:

1. Algunos pasos del proceso de reclutamiento no están automatizados. Como resultado, los reclutadores tienen que procesar una gran cantidad (a veces cientos, o incluso miles) de hojas de vida manualmente para elegir el mejor empleado potencial.
2. Los reclutadores generalmente no toman en consideración todas las alternativas posibles para el empleado.
3. Los reclutadores se guían solo por su opinión subjetiva, por lo que no hay garantía de que el candidato elegido sea realmente la mejor opción posible para el empleador.

La contratación y selección de personal afecta directamente la calidad de los empleados. Se han realizado varios estudios sobre currículums, entrevistas, centros de evaluación, pruebas de conocimiento del trabajo, muestra de trabajo, pruebas, pruebas cognitivas y pruebas de personalidad en la gestión de recursos humanos

para ayudar a las organizaciones a tomar mejores decisiones de selección de personal. De hecho, los enfoques de selección existentes se centran en las funciones del trabajo y el análisis de tales funciones que se definen a través de actividades y tareas específicas basadas en sus propiedades estáticas [8]. Los procesos mencionados generan una cantidad importante de datos referentes al reclutamiento, el presente estudio pretende aprovechar las técnicas de aprendizaje automático sobre estas bases de datos.

El aprendizaje automático consiste en la aplicación de técnicas de origen estadístico sobre conjuntos de datos para el aprendizaje de patrones ocultos, proyecciones o predicciones de las observaciones, mediante la aplicación de algoritmos se puede extraer información valiosa de los datos de un dominio específico de manera automática [9].

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera, en la sección 1.1 se presentan diferentes trabajos relacionados con el área de la inteligencia artificial y su aplicación en la gestión de recursos humanos, cuando se considera oportuno se introducen diferentes conceptos. La sección 2 presenta la metodología de trabajo, detallando las técnicas que se aplicaron. La sección 3 muestra los resultados relevantes que se obtuvieron y, finalmente, la sección 4 expone las conclusiones del presente trabajo.

1.1. Trabajos relacionados

Las organizaciones están comenzando a adoptar y capitalizar la funcionalidad de la inteligencia artificial en sus procesos de reclutamiento [10]. Las aplicaciones de sistemas expertos o sistemas de ayuda a la toma de decisiones para seleccionar personal y el reclutamiento está incrementando [8, 9, 11–14].

Para la solicitud y selección de trabajo, la inteligencia artificial puede utilizar características conductuales y fisiológicas (por ejemplo, biometría) como parte del proceso general de toma de decisiones [10]. Algunos ejemplos de implementaciones son el uso de herramientas multimedia [15], sistemas de seguimiento de candidatos en línea [16], sistemas de aprendizaje automático [17], sistemas de soporte a la toma de decisiones que ayudan en el proceso completo de categorizar e identificar discapacidades [9], sin embargo, en la actualidad no se está aprovechando la riqueza de la minería de datos.

Hoy en día, existen un sinnúmero de técnicas de inteligencia artificial como la minería de datos, la analítica de datos y el descubrimiento de información en base de datos que, mediante técnicas de aprendizaje automático, proporcionan a las organizaciones tareas de predicción y clasificación, para dar soporte a la toma de decisiones, entre ellas las de gestión del talento humano.

La minería de datos hace referencia a la extracción de patrones o reglas útiles de una extensa fuente de datos, a través de la exploración automática o semiautomática y del análisis de datos [18]. Para este trabajo la aplicación de técnicas de aprendizaje automático constituye el proceso de minería de datos, según la literatura existe el consenso de clasificar las técnicas de aprendizaje automático en técnicas de aprendizaje supervisado, no supervisado y aprendizaje por refuerzo [19].

El presente trabajo se enfoca en la tarea de aplicar técnicas de aprendizaje supervisado como la clasificación y técnicas de aprendizaje no supervisado como el *clustering* a la base de datos recopilada en el proyecto de inclusión educativa y laboral de personas con discapacidad de la Universidad Politécnica Salesiana.

Las técnicas supervisadas permiten clasificar a un candidato con discapacidad para un puesto de trabajo como apto o no. Desde el punto de vista computacional se trata de una tarea de clasificación, sin embargo, la condición de discapacidad sesga los datos a una población muy reducida, en primer lugar, no existen suficientes datos sobre los mismos y la muestra está limitada al dominio de la ciudad de Cuenca-Ecuador.

Clasificar es una tarea de aprendizaje supervisado, donde la clase o el objetivo de clasificación es conocido. Existen varias técnicas usadas para clasificación en minería de datos como árboles de decisión, técnicas bayesianas, lógica difusa, máquinas de soporte vectorial, redes neuronales, algoritmos genéticos y el algoritmo de los vecinos más cercanos. En el presente estudio se aplican varias técnicas para determinar la que mejor se adapta a la información recolectada sobre los candidatos con discapacidad.

El *clustering* consiste en encontrar patrones ocultos en los datos, agrupamientos naturales que no son perceptibles en el entorno de alta dimensionalidad que presentan los conjuntos de datos modernos [19], en este caso setenta características. Debido a la alta dimensionalidad, el trabajo busca determinar correlaciones entre las distintas características para de esta manera eliminar aquellas que presenten un alto índice de correlación. Asimismo se probó con técnicas de reducción de dimensionalidad.

Es importante mencionar una línea de investigación con mucha perspectiva de crecimiento en el campo del aprendizaje automático para el apoyo a la gestión de recursos humanos, se trata del procesamiento de lenguaje natural, y como tecnología disruptiva actualmente los *chatbots* se ocupan de tareas como entrevistas a candidatos, capacitación a personal, atención de clientes y cualquier tarea que requiera comunicación entre personas y un agente inteligente [20]. En el área de reclutamiento de personal es importante mencionar que los *chatbots* son capaces de manejar una cantidad significativa de información que muchas de las veces los entrevistadores pasan por alto [21].

2. Materiales y métodos

Se utilizó como línea de base el trabajo [22], que consiste en 120 muestras de datos, con 70 características referentes a edad, sexo, nivel de educación, experiencia laboral, dominio de lengua extranjera, tipo de discapacidad y las destrezas transversales de cada candidato. El estudio original utiliza un sistema basado en reglas validado por expertos. Nuestra propuesta incorpora como novedad el aprendizaje a partir del conjunto de datos original para predecir si un candidato es apto o no para un puesto, de esta forma, el sistema mediante técnicas de aprendizaje supervisado no requiere de la validación de expertos.

La dispersión de los datos es la característica más relevante del conjunto de datos, es decir, contamos con una matriz a la cual le falta información, y dicha información no puede ser considerada como 0 en el proceso de análisis puesto que esto podría sesgar los resultados del análisis. La Tabla 1 muestra un resumen de las diferentes características del conjunto de datos.

Tabla 1. Características del conjunto de datos

Tipo de información	Descripción
Información descriptiva	Detalles descriptivos de cada aspirante, la característica más relevante en este caso es la edad y el tipo de discapacidad
Información de adaptaciones	Hace referencia al uso de dispositivos auxiliares por parte del aspirante, así como su necesidad de apoyarse en un intérprete o haber desarrollado destrezas como el lenguaje de señas
Estudios	Nivel de educación del aspirante
Información del cargo	Varias características que informan sobre el detalle del cargo
Información de la experiencia	Características que recopilan la experiencia laboral pasada del aspirante
Parámetros óptimos para aplicar a un cargo	Parámetros deseables para la aplicación a un cargo
Parámetros obtenidos por el aspirante	Valoración de cada aspirante en los diferentes parámetros
Manejo de otros idiomas	Detalle sobre el dominio de otros lenguajes
Capacitación	Características que recopilan información de las capacitaciones recibidas

Para el presente trabajo se imputaron los datos y se eliminaron aquellas características que no aportaban suficiente información al sistema, ya sea porque los datos recopilados representaban una cantidad insignificante de la población de estudio o porque la característica presentaba descripciones tipo texto que no aportan información al sistema. Luego de este proceso se cuenta con una matriz completa.

Para validar la eliminación de características se realizó un análisis de similitudes entre el conjunto de datos original, el que contiene los datos dispersos; y el conjunto de datos posterior a la imputación. Se utilizaron diferentes métricas de similitud según el

estudio [23], siendo relevantes para este estudio la similitud de Pearson y la de Jaccard para el conjunto de datos completo (con características dispersas) y con el conjunto de datos modificado se consideró únicamente la similitud de Pearson.

En la Ecuación (1) se puede apreciar cómo se calcula la similitud entre el aspirante u y el aspirante v en una matriz dispersa, donde i representa la i -ésima característica y r el valor de la característica. Sea, además, I' el conjunto de todas las características en común entre u y v .

$$S_{PC}(u, v) = \frac{\sum_{i \in I'} (r_{ui} - \bar{r}_u)(r_{vi} - \bar{r}_v)}{\sqrt{\sum_{i \in I'} (r_{ui} - \bar{r}_u)^2} \sqrt{\sum_{i \in I'} (r_{vi} - \bar{r}_v)^2}} \quad (1)$$

La Ecuación (2) es utilizada para calcular la similitud de Jaccard, en este caso lo importante es determinar si existe intersección entre las características de u y v sin importar la diferencia de magnitud entre sus valores.

$$S_{Jac}(u, v) = \left| \frac{I_u \cap I_v}{I_u \cup I_v} \right| \quad (2)$$

Los resultados muestran que el promedio de similitud entre usuarios de un mismo grupo de aspirantes con la misma discapacidad está alrededor de un 0,1 tanto para la similitud de Pearson y ligeramente inferior para la de Jaccard.

Con el conjunto de datos modificado no tiene sentido aplicar similitud de Jaccard puesto que siempre dará uno, ya que se trata de una matriz completa, sin embargo, con la similitud de Pearson se obtiene una mejoría en el promedio de similitud entre usuarios de un mismo grupo de aspirantes con la misma discapacidad de 0,25, lo cual es evidencia que la eliminación de algunas características simplificó el sistema y mejoró los resultados.

Con el nuevo conjunto de datos se procedió a generar un mapa de calor para determinar correlaciones entre las características de los aspirantes. La Figura 2 presenta el mapa de calor entre las características más relevantes, donde la intersección de cada fila y columna representa el coeficiente de correlación en el rango de $[-1, 1]$, donde valores cercanos a -1 significan una correlación fuerte inversamente proporcional y valores cercanos a 1 significan una correlación fuerte directamente proporcional, valores cercanos a 0 significan que no existe correlación.



Figura 2. Mapa de calor de las correlaciones entre las características más relevantes del conjunto de datos

En este primer análisis resulta notorio la relación directa que existe entre la experiencia y el nivel de discapacidad del aspirante (moderada, leve). Por un lado, la empresa privada tiene una relación directa con el nivel de discapacidad leve, y la empresa pública tiene una relación directa con el nivel de discapacidad moderado.

Adicionalmente, se procedió a visualizar si existen relaciones entre las diferentes características mediante un gráfico de dispersión. La Figura 3 permite apreciar la dispersión de puntos entre las diferentes parejas de características del conjunto de datos, la diagonal muestra el histograma de cada característica.

Luego del análisis estadístico se procedió a la analítica de los datos, donde este trabajo tiene dos objetivos, el primero es generar un modelo de clasificación para la correcta asignación de una persona a un cargo. Segundo, mediante técnicas de *clustering* se pretende descubrir la cohesión de los grupos de aspirantes.

En el primer caso se compararán técnicas de clasificación como la regresión logística, máquinas de soporte vectorial y el algoritmo de los vecinos más cercanos. En el segundo caso se utilizará como algoritmo de *clustering k-means*.

3. Resultados y discusión

3.1. Clasificación

Al diseñar el modelo se utilizaron diferentes técnicas de clasificación, entre ellas, un esquema de regresión logística binaria, puesto que el objetivo es intentar predecir si una persona es adecuada para el cargo o no. La regresión logística fue probada con hipótesis de tipo lineal, cuadrática y cúbica, también se implementaron las técnicas de *Support Vector Machines* (SVM) con

un kernel gaussiano y el algoritmo de los vecinos más cercanos (KNN) para resultados con 3 y 5 vecinos.

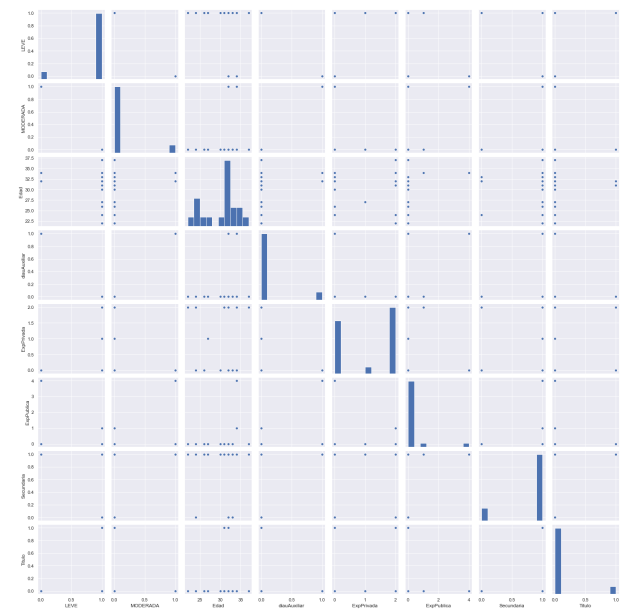


Figura 3. Gráficos de dispersión entre parejas de características

Para validar los resultados se procedió a dividir el conjunto de datos en cinco conjuntos aleatorios de *train* y *test* en una proporción de 80 % y 20 %, respectivamente. Los resultados muestran el promedio de los cinco conjuntos aleatorios en *testing*. La métrica utilizada para comparar la calidad de la predicción es la precisión según la Ecuación (3), donde TP representa el número de clasificaciones realizadas correctamente (verdaderos positivos) y FP el número de clasificaciones incorrectas (falsos positivos).

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

Los resultados de los diferentes modelos se aprecian en la Tabla 2. Si bien los mejores resultados se obtienen con SVM, la diferencia en la precisión con la regresión logística no es considerable, por ello para simplificar el modelo se puede utilizar la regresión logística.

Tabla 2. Resultados de técnicas de clasificación

Técnica	Parámetros	Precisión
Regresión logística	Función lineal	0,805
Regresión logística	Función cuadrática	0,815
Regresión logística	Función cúbica	0,818
SVM	Gaussian Kernel	0,821
KNN	3 vecinos	0,791
KNN	5 vecinos	0,798

3.2. Clustering

La técnica más famosa y bien conocida de *hard clustering* es el algoritmo k-means [24,25] o *hard c-means*, que presenta las siguientes ventajas:

- Conceptualmente es simple, versátil y fácil de implementar.
- Presenta una complejidad lineal con respecto al número de elementos y clústers.
- Se garantiza que el algoritmo termina con una tasa de convergencia cuadrática [23].

Para medir la calidad de *clustering* se utilizó la medida de cohesión J_c según la Ecuación 4, donde X representa la muestra del aspirante en cuestión y C representa el centroide al que pertenece.

$$J_c = \sum_{j=1}^c \sum_{t=1}^n \|X_t - C_j\|^2 \quad (4)$$

El algoritmo k-means utiliza el parámetro K como el indicador de los grupos a clasificar; sin embargo, el reto es determinar qué cantidad de grupos deben existir para expresar la mejor representación de los mismos. Para el conjunto de datos de los aspirantes se procedió a determinar la calidad de *clustering* desde $k = 2$ hasta $K = 10$. En la Figura 4 mediante el método *Elbow* [26] se puede apreciar que no existe una clara determinación en los grupos de aspirantes; se podría considerar tanto el valor de $K = 3$ como el valor de $K = 6$ como puntos de inflexión donde la calidad del *clustering* se estabiliza según la curva. Esto muestra que la información que se está recopilando en el sistema requiere más trabajo, tanto en cantidad como en calidad de las características.

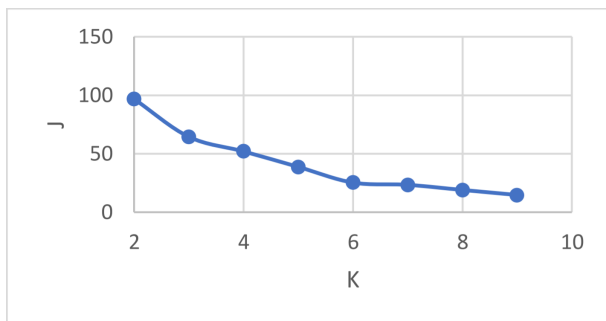


Figura 4. *Elbow method* para $k = 2$ hasta $k = 10$

4. Conclusiones

El presente estudio permite visualizar las correlaciones que existen entre diferentes variables del conjunto de datos, aportando como novedad la incorporación de técnicas de aprendizaje automático, tanto de aprendizaje

supervisado para apoyar los procesos de selección del talento humano con discapacidad como de aprendizaje no supervisado para determinar en el alto espacio dimensional la cantidad de grupos de candidatos que existen en el conjunto de datos.

De acuerdo con el estudio realizado se pudo observar que el factor más determinante a la hora de conseguir empleo para una persona con discapacidad es su experiencia, es decir, haber trabajado previamente en algún lugar; en el conjunto de datos existe una correlación directa entre los aspirantes que fueron considerados aptos y la experiencia previa, sin embargo, los aspirantes que pese a ser aptos y no han sido ubicados, tienen como factor común no disponer de dicha experiencia; lo cual evidencia que para el caso de estudio, la principal característica que determina que una persona con discapacidad obtenga un cargo es esta experiencia, factor que puede ser considerado discriminatorio ya que atenta contra la igualdad de oportunidades. El conjunto de datos con el que se trabajó es considerado el más completo de su tipo para selección de personal con discapacidad, sin embargo, el presente estudio ha demostrado que se requieren características más relevantes. Es preciso mencionar que el estudio también encuentra limitaciones en la cantidad de muestras, actualmente el conjunto de datos ofrece 120 lo cual limita a las técnicas de aprendizaje automático, para el futuro sería interesante contar con un conjunto de datos mucho más grande para aplicar técnicas de aprendizaje profundo.

Varios estudios demuestran que el nivel de educación mejora la oportunidad de conseguir empleo [27], situación que no se cumple en el conjunto de datos analizado. Dichos estudios demuestran también que las personas con discapacidades tienen un nivel de educación inferior, comparado con la población general, elemento que es fácilmente verificable en este caso de estudio. La preparación académica determina que las personas con discapacidad están en desventaja para las labores que exige el mercado por razones que van más allá de la misma discapacidad. Tanto la capacitación como el nivel educativo influye notablemente en las oportunidades de trabajo, ya que en este proceso de formación se adquieren las habilidades y conocimientos dentro un área específica [28]. Los sistemas actuales continúan siendo discriminatorios para estas personas, puesto que la mayoría de organizaciones privilegia la experiencia y esto induce a una pobre valoración de las actitudes de estas personas. Situación que se ve reflejada en la calidad de los sistemas de predicción y la incapacidad para descubrir patrones de *clustering* claros en los datos proporcionados.

Se considera que un campo novedoso de estudio en los procesos de reclutamiento es la aplicación de *chatbots* en las entrevistas de selección de personal, puesto que permite eliminar elementos subjetivos que los expertos consideran que son variables de confusión

que orientan en uno u otro sentido las entrevistas, factores subjetivos como la imagen personal percibida por el entrevistador, su estado de ánimo son elementos difíciles de medir y que por tanto podrían eliminarse con una adecuada selección de grupos de experimentales y de control [29].

Si bien es cierto que las políticas públicas han contribuido a la inclusión laboral de personas con discapacidad, es necesario que las empresas apoyadas en la tecnología vayan acortando las brechas que actualmente existen, asimismo eliminar en los estereotipos que impiden reconocer y potenciar las cualidades de las personas con discapacidad impidiendo así aprovechar su talento.

Agradecimiento

Los autores agradecen al grupo de investigación de inteligencia artificial y tecnologías de asistencia (GIIATA) y a Cátedra UNESCO, quienes facilitaron los datos que condujeron el presente estudio.

Referencias

- [1] Consejo Nacional de Planificación, *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida*. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Senplades. Quito – Ecuador, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3isgCNb>
- [2] Asamblea Nacional, *Ley Orgánica de Discapacidades*. Registro Oficial N.º 796. República del Ecuador, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3cXWwch>
- [3] H. Jantan, A. Hamdan, and Z. Othman, “Human talent prediction in HRM using C4.5 classification algorithm,” *International Journal on Computer Science and Engineering*, vol. 2, pp. 2526–2534, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aIbF1x>
- [4] L. Morton, “Talent management value imperatives: Strategies for execution,” in *Conference Board*, 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/2S4TyN0>
- [5] Ministerio de Relaciones Laborales, *Manual de Buenas Prácticas para la inclusión laboral de personas con discapacidad*. Dirección de Atención a Grupos Prioritarios. Consejo Nacional de Discapacidades. Ecuador, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/32S8PD4>
- [6] Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades. (2020) Estadísticas de discapacidad. [Online]. Available: <https://bit.ly/3vn30JT>
- [7] E. Kalugina and S. Shvydun, “An effective personnel selection model,” *Procedia Computer Science*, vol. 31, pp. 1102–1106, 2014, 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.365>
- [8] C.-F. Chien and L.-F. Chen, “Data mining to improve personnel selection and enhance human capital: A case study in high-technology industry,” *Expert Systems with Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 280–290, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.09.003>
- [9] G. Harih and N. Vujica-Herzog, “Towards an expert system for assigning optimal workplaces to workers with disabilities,” in *Advances in Social and Occupational Ergonomics*, R. H. Goossens and A. Murata, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 57–66. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20145-6_6
- [10] P. van Esch, J. S. Black, and J. Ferolie, “Marketing AI recruitment: The next phase in job application and selection,” *Computers in Human Behavior*, vol. 90, pp. 215–222, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.09.009>
- [11] R. Storey Hooper, T. P. Galvin, R. A. Kilmer, and J. Liebowitz, “Use of an expert system in a personnel selection process,” *Expert Systems with Applications*, vol. 14, no. 4, pp. 425–432, 1998. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00002-5)
- [12] M. Nussbaum, M. Singer, R. Rosas, M. Castillo, E. Flies, R. Lara, and R. Sommers, “Decision support system for conflict diagnosis in personnel selection,” *Information & Management*, vol. 36, no. 1, pp. 55–62, 1999. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0378-7206\(99\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7206(99)00007-5)
- [13] S. M. C. Loureiro, J. Guerreiro, and I. Tussyadiah, “Artificial intelligence in business: State of the art and future research agenda,” *Journal of Business Research*, vol. 129, pp. 911–926, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.11.001>
- [14] H. J. Wilson and P. R. Daugherty, “Collaborative intelligence: Humans and AI are joining forces,” *Harvard Business Review*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3np0JOx>
- [15] S. T. Hunter, N. D. Shortland, M. P. Crayne, and G. S. Ligon, “Recruitment and selection in violent extremist organizations: Exploring what industrial and organizational psychology might contribute,” *The American psychologist*, vol. 72, pp. 242–254, Apr 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1037/amp0000089>

- [16] A. Eckhardt, S. Laumer, C. Maier, and T. Weitzel, "The transformation of people, processes, and it in e-recruiting," *Employee Relations*, vol. 36, no. 4, pp. 415–431, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/ER-07-2013-0079>
- [17] N. Herbst, S. Becker, S. Kounev, H. Koziolk, M. Maggio, A. Milenkoski, and E. Smirni, *Metrics and Benchmarks for Self-aware Computing Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 437–464. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47474-8_14
- [18] M. J. A. Berry and G. S. Linoff, *Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management*. John Wiley & Sons, 2004. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tXJh37>
- [19] P.-N. Tan, M. Steinbach, and V. Kumar, *Introduction to data mining*. Pearson Education, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3voKVeG>
- [20] J. Hill, W. Randolph Ford, and I. G. Farreras, "Real conversations with artificial intelligence: A comparison between human-human online conversations and human-chatbot conversations," *Computers in Human Behavior*, vol. 49, pp. 245–250, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.02.026>
- [21] A. M. Rahman, A. A. Mamun, and A. Islam, "Programming challenges of chatbot: Current and future prospective," in *2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 2017, pp. 75–78. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2017.8288910>
- [22] M. Rodas-Tobar, C. Bernal-Bravo, M. Andrés-Romero, A. Pinos-Figueroa, P. Vidal-Mogrovejo, A. León-Pesántez, V. Robles-Bykbaev, and F. Pesántez-Avilés, "An expert system to support the provisioning of staff with disabilities in industry," in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2018.8646043>
- [23] R. X. Bojorque Chasi, "Clustering de sistemas de recomendación mediante técnicas de factorización matricial," Ph.D. dissertation, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.58156>
- [24] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 1967. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xrH16A>
- [25] S. Zahra, M. A. Ghazanfar, A. Khalid, M. A. Azam, U. Naeem, and A. Prugel-Bennett, "Novel centroid selection approaches for kmeans-clustering based recommender systems," *Information Sciences*, vol. 320, pp. 156–189, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.03.062>
- [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," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 336, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/336/1/012017>
- [27] T. Boman, A. Kjellberg, B. Danermark, and E. Boman, "Employment opportunities for persons with different types of disability," *Alter*, vol. 9, no. 2, pp. 116–129, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.alter.2014.11.003>
- [28] M. A. Espinoza Mina and D. Gallegos Barzola, "Inserción laboral de las personas con discapacidad en Ecuador," *Espacios*, vol. 39, no. 51, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sXKMwS>
- [29] M. Reynolds, "Ai coach helps chatbots seem more human," *New Scientist*, vol. 235, no. 3135, p. 14, 2017. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(17\)31407-0](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(17)31407-0)



EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN PÓRTICO PLANO (MDOF) EN UNA MESA VIBRATORIA

EVALUATION OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF A 2D-FRAME (MDOF) IN A SHAKE TABLE

Andrea Tapia Andrade^{1,*} , Wilson Torres Berni¹

Recibido: 14-11-2020, Recibido tras revisión: 22-02-2021, Aceptado: 04-03-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

Hoy en día, el estudio de la dinámica estructural es fundamentalmente teórico con acceso a ciertas simulaciones vía *software*, sin embargo, este proyecto intenta que el estudiante pueda entender y observar de manera física las respuestas dinámicas de modelos experimentales. Estos modelos corresponden a pórticos planos de múltiples grados de libertad, que están sometidos a aceleración en la base, la cual es generada por una mesa vibratoria. Los resultados obtenidos se compararán con teóricos. Estos fueron obtenidos basándose en la descomposición modal y en el método de Newmark para el cálculo de la respuesta dinámica, considerando variación lineal en la aceleración de cada piso. La aplicación generada, ATH Dynamic Responses, proporcionó las respuestas teóricas, mediante una interfaz gráfica amigable para el usuario. Los modelos experimentales están constituidos por dos materiales: acero inoxidable (parantes) y láminas de acrílico (pisos), y fueron ensayados sobre una mesa vibratoria. La adquisición de datos se realizó mediante acelerómetros que se colocaron en cada piso y sobre la mesa vibratoria, fueron corregidos, tanto por línea base como con el filtro pasa bajo. Los resultados obtenidos muestran que la instrumentación con una mesa vibratoria y adquisición de datos con acelerómetros proporcionan valores muy similares a los teóricos en cuanto a respuestas dinámicas y propiedades modales.

Palabras clave: descomposición modal, dinámica estructural, modelo experimental, mesa vibratoria, Newmark, filtro

Abstract

At present, the study of structural dynamics is mainly theoretical with access to certain simulations through software, however, this project attempts that the student may understand and physically observe the dynamic responses of experimental models. These models correspond to 2D - frames with multiple degrees of freedom that are subjected to acceleration in the base; this acceleration is generated by a Shake Table II, and the results obtained will be compared with theoretical results. These theoretical results were obtained based on modal decomposition and Newmark's method for calculating the dynamic response, considering the linear variation in the acceleration of each floor. The application developed, ATH Dynamic Responses, provided the theoretical responses through a graphical interface friendly for the user. The experimental models are constituted by two materials: stainless steel for frame legs and acrylic sheets for floors; these were tested on a Shake Table II. The data was acquired using accelerometers that were placed in each floor and in the shake table, and they were corrected both by baseline and with the low pass filter. The results obtained show that the instrumentation with the Shake Table II and the data acquisition with accelerometers provide results similar to the theoretical ones regarding dynamic responses and modal properties.

Keywords: modal decomposition, structural dynamics, experimental model, Shake Table, Newmark, filter

^{1,*}Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador
 Autor para correspondencia ✉: atapiaa@est.ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Tapia Andrade, A. y Torres Berni, W. (2021). «Evaluación de las propiedades dinámicas de un pórtico plano (MDOF) en una mesa vibratoria». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 49-62. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.05>.

1. Introducción

Ecuador tiene una actividad sísmica considerable, el último sismo que afectó en gran intensidad al país ocurrió el 16 de abril de 2016 con una magnitud de momento M_w 7.8, sucedió en las provincias costeras de Manabí y Esmeraldas [1], dejando daños materiales, colapsos en edificaciones y cerca de setecientos muertos.

El terremoto se originó debido a la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa sudamericana; el rozamiento entre ambas placas produce acumulación de energía elástica, la cual se relaja cuando existe una ruptura súbita y se produce el evento sísmico [2].

Esto ha motivado a los ingenieros a desarrollar una filosofía que se centre en impedir la pérdida de vidas, controlando el colapso de todas las estructuras [3]. Por lo cual toda edificación debe ser diseñada considerando la sollicitación sísmica; el análisis de la estructura frente a este tipo de carga es el principal problema que intenta resolver la dinámica estructural.

En la mayoría de los casos, el estudio de la dinámica estructural se lo realiza de manera teórica, sin poder observar físicamente el comportamiento de las estructuras ante un sismo o aceleración en la base. Por lo cual este proyecto se centra en construir modelos experimentales de múltiples grados de libertad con materiales apropiados, eso significa losas muy rígidas comparadas con los pilares a flexión, donde el modelo va a concentrar la deformación de la estructura. Además, tanto los pilares como los pisos se consideran axialmente rígidos, en el modelo analítico, se va a considerar que los pisos concentran la masa, y que los parantes son quienes colaboren con la rigidez, es decir, que se comporte como un edificio a corte [4].

Para obtener respuestas dinámicas y propiedades modales en modelos experimentales y estructuras reales se han implementado técnicas experimentales, como la colocación de acelerómetros triaxiales, o la utilización de equipos de excitación dinámicas que reproducen sismos a escala [5]. En el proyecto se utilizó una mesa vibratoria, conocida como Shake Table II [6]. Este dispositivo es un simulador de terremotos para modelos físicos académicos pequeños (masa máxima = 7,5 kg), que permitirá generar aceleraciones de piso en forma de pulsaciones, barridos sinusoidales y registros sísmicos (escalados) [6]. La Shake Table II permite reproducir aceleraciones de piso en dos direcciones (x, y), sin embargo, para el proyecto se trabajó con modelos planos, se utilizó aceleración unidireccional, cada piso solo se moverá en una dirección [7].

En [8, 9] y [10] se han determinado propiedades dinámicas de estructuras experimentales con el mismo método, sin embargo, estas se centran solo en desplazamientos máximos y otras solo en la obtención de frecuencias, además, están limitados a dos pisos. En el

proyecto se analizará desde la obtención de frecuencias, amortiguamientos y, además, los modelos por su modo de construcción, tienen la posibilidad de apilarse y llegar hasta un modelo de seis pisos, siendo la única limitante, el peso máximo que soporte la mesa vibratoria.

2. Materiales y métodos

En el proyecto consta del sustento teórico, donde se da a conocer los conceptos de la dinámica estructural utilizados para el desarrollo del script en MatLab; y la parte experimental, donde se establece el tipo de material a utilizarse, las características geométricas, la aceleración de la base, la aceleración de cada piso, la operación de la mesa vibratoria, la forma de adquirir respuestas y su procesamiento.

2.1. Sistema de múltiples grados de libertad

Un sistema de múltiples grados de libertad (MDOF) se puede entender desde el punto de vista de la dinámica estructural como aquel que requiere más de una coordenada para describir su movimiento. Los grados de libertad también pueden determinar las direcciones de la aceleración de las masas concentradas. En el proyecto, la dirección del sismo será uniaxial, por lo tanto, el número de grados de libertad, será uno por cada piso [7].

Los modelos experimentales son modulares y pueden llegar a sistemas desde uno hasta seis grados de libertad, los ensayos fueron realizados con los sistemas de uno, dos y tres grados de libertad. En la Figura 1 se muestra el modelo de tres grados de libertad.

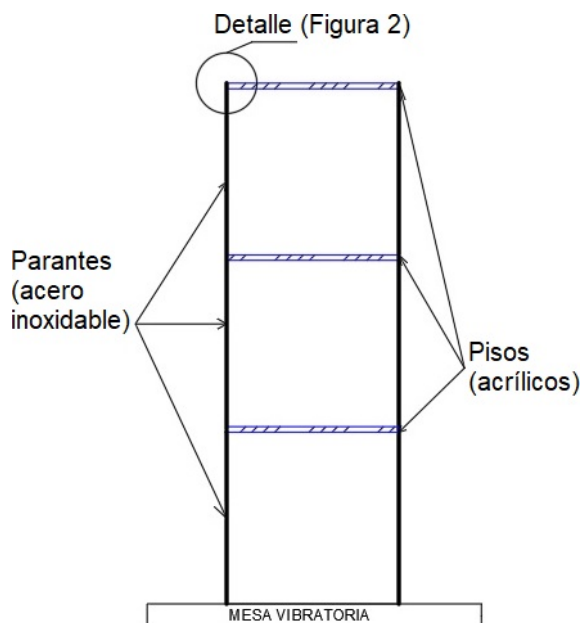


Figura 1. Modelo de tres grados de libertad

2.2. Edificio a cortante

Un edificio a cortante se caracteriza como un arreglo que concentra la masa en cada piso, además, deben actuar como diafragmas infinitamente rígidos a flexión y carga axial. Por lo tanto, en el modelo, solo las columnas deben colaborar con la rigidez [4].

Las consideraciones realizadas anteriormente permiten simplificar la estructura y resolver el problema como un MDOF, donde las losas infinitamente rígidas, permiten asegurar que no existirán rotaciones entre parantes y pisos. En el modelo experimental la rotación se controló en función de la conexión que tiene el parante y el acrílico, ya que la conexión no está fija en un punto, sino en un área como se observa en la Figura 2. En cuanto a la deformación axial, será despreciable, debido a las características físicas de los pisos.

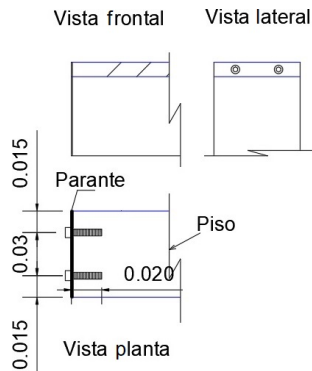


Figura 2. Detalle de conexión

En el modelo experimental, se debe tener en cuenta que las columnas aportan masa, por lo cual se realizó la consideración de que la losa concentra la mitad de la masa de cada columna que esta sobre y bajo de ella, como se muestra en la Figura 3.

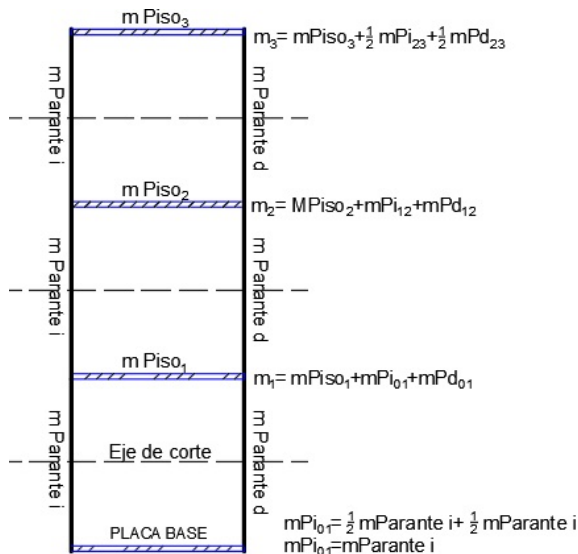


Figura 3. Distribución de masa de la estructura

Donde: $m_{Pi_{ij}}$ y $m_{Pd_{ij}}$ es la masa del parante desde el grado de libertad i hasta el grado de libertad j .

Eje de corte: es el que ayuda a cuantificar cómo se concentró la masa de cada piso.

2.3. Fuerza inercial

Relaciona las fuerzas externas que actúan sobre la masa de la estructura con las aceleraciones de los grados de libertad dinámicos como se muestra en la Ecuación (1) [11].

$$\{F_i\} = [M] \times \{\ddot{x}\} \quad (1)$$

Donde $\{F_i\}$ es el vector de la fuerza de inercial, $[M]$ es matriz de masa y $\{\ddot{x}\}$ es el vector de aceleración de los grados de libertad.

La matriz de masa (2) es una estimación de la masa de toda la estructura, a esta matriz también se la conoce como «matriz de masa concentrada» [12].

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.4. Fuerza elástica

Relaciona las fuerzas externas sobre la rigidez de la estructura con los desplazamientos de los grados de libertad dinámicos, como se muestra en la Ecuación (3) [11].

$$\{F_s\} = [K] \times \{x\} \quad (3)$$

Donde $\{F_s\}$ es el vector de la fuerza elástica, $[K]$ es matriz de rigidez y $\{x\}$ es el vector de desplazamiento de los grados de libertad.

La matriz de rigidez (4) incluye propiedades de las columnas, como son la longitud, área y módulo de elasticidad [12].

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{N1} & k_{N2} & \cdots & k_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.5. Fuerza de amortiguamiento

Es un mecanismo con el cual se puede disipar energía de la estructura, según esto se relacionan las fuerzas externas que actúan sobre el amortiguamiento con las velocidades de los grados de libertad dinámicos como se muestra en la Ecuación (5) [11].

$$\{F_d\} = [C] \times \{\dot{x}\} \quad (5)$$

Donde $\{F_d\}$ es el vector de la fuerza de amortiguamiento, $[C]$ es matriz de amortiguamiento y $\{\dot{x}\}$ es el vector de velocidad de los grados de libertad.

Para la obtención de la matriz de amortiguamiento se va a suponer amortiguamiento clásico. La matriz de amortiguamiento clásico se puede utilizar en este tipo de modelos, si los mecanismos de amortiguación son similares en toda la estructura, es decir, una estructura que sea de MDOF y que a su vez esté conformada por un mismo sistema estructural y materiales similares, en toda la altura [11].

Uno de los procedimientos dentro del amortiguamiento clásico es el amortiguamiento modal. El análisis provee el amortiguamiento de un número específico de modos, como se indica en la Ecuación (6) [13] y [14].

$$\{\phi_n\}^T \times [C] \times \{\phi_n\} = 2 \times \xi_n \times \omega_n \quad (6)$$

Donde C es matriz de amortiguamiento, ϕ_n es el vector de cada forma modal, ξ_n es el factor de amortiguamiento, ω_n frecuencia natural, y n es número de modos.

2.5.1. Factor de amortiguamiento

Una característica importante es el amortiguamiento de la estructura, el cual queda definido con base en el factor de amortiguamiento, por esta razón hace falta obtenerlo aplicando el método del ancho de banda descrito a continuación [15].

a) Ancho de banda

Se trata de un método para la obtención del factor de amortiguamiento en el dominio de la frecuencia; esta técnica es ampliamente utilizada en la práctica profesional, en la cual una estructura debe ser excitada por pulsaciones simultáneas o individuales a diferentes frecuencias [16].

Con el fin de aplicar el método se debe considerar el efecto del movimiento de la base, por lo cual se procede a encontrar el cociente entre las amplitudes de la transformada de Fourier de los registros de aceleración de cada losa con respecto a los registros de la base. A esto se lo conoce como transmisibilidad [11], la cual se indica en la Ecuación (7).

$$Tr = \frac{\alpha_o(\omega)}{\alpha_b(\omega)} \quad (7)$$

Donde Tr es transmisibilidad, $\alpha_o(\omega)$ amplitud de la aceleración de cada piso en el dominio de la frecuencia y $\alpha_b(\omega)$ amplitud de la aceleración de la base en el dominio de la frecuencia.

A partir del cálculo de la transmisibilidad se obtienen gráficas respecto de la frecuencia y el factor de amortiguamiento se determina mediante la diferencia entre dos frecuencias llamadas puntos de media potencia sobre la frecuencia correspondiente de cada modo. Los puntos de media potencia son las frecuencias que se encuentran a $\frac{1}{\sqrt{2}}$ de la amplitud máxima

de la transmisibilidad, como se indica en la Figura 4, y esto permitirá aplicar la Ecuación (8) [17].

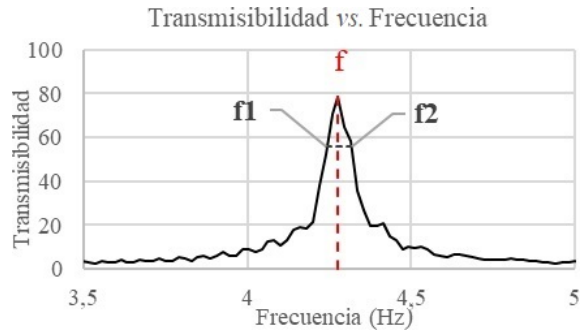


Figura 4. Ancho de banda

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2 \times f} \quad (8)$$

Donde f es la frecuencia con amplitud máxima (Hz), f_1 y f_2 son las frecuencias de media potencia (Hz).

2.6. Ecuación del movimiento

Con base en las fuerzas detalladas en las secciones anteriores, se establecerá la ecuación del sistema MDOF, tomándose en cuenta la segunda ley del movimiento de Newton, se obtiene la Ecuación (9).

$$[M] \times \{\ddot{u}\} + [C] \times \{\dot{u}\} + [K] \times \{u\} = -[M] \times \{\iota\} \times \{\ddot{x}_o\} \quad (9)$$

Donde $\{\iota\}$ es el vector de colocación, $\{\ddot{x}_o\}$ la aceleración de piso para cada instante de tiempo y u es la coordenada relativa de cada grado de libertad respecto de la base.

En la Figura 5 se presentan las fuerzas actuantes, sobre el sistema.

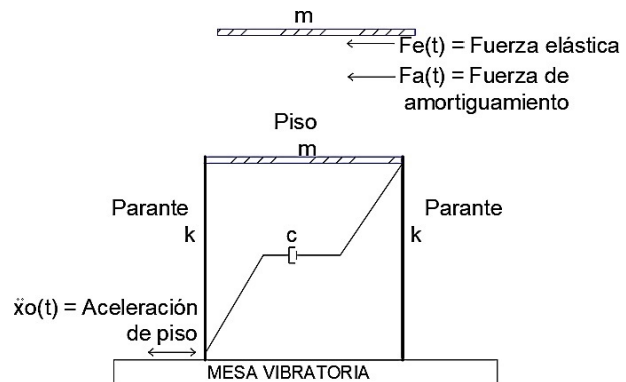


Figura 5. Fuerzas actuantes

2.7. Método de Newmark

Es un método muy versátil, para el cálculo de la respuesta un sistema dinámico. En 1959, N. M. Newmark desarrolló una familia de métodos dependiendo de la ley de variación entre instantes consecutivos de tiempo [11]; el que se utilizó es el de aceleración lineal como se muestra en la Figura 6.

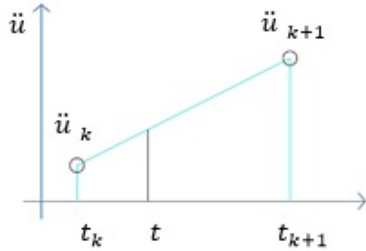


Figura 6. Aceleración lineal

La representación matricial del método aplicado para la obtención de las respuestas de aceleración, velocidad y posición en el tiempo para un sistema de un grado de libertad, se muestra en la Ecuación (10), donde la respuesta en instante $k + 1$, solo depende de la respuesta del instante k [11].

$$\begin{pmatrix} u_{k+1} \\ \dot{u}_{k+1} \\ \ddot{u}_{k+1} \end{pmatrix} = [A] \times \begin{pmatrix} u_k \\ \dot{u}_k \\ \ddot{u}_k \end{pmatrix} + [B] \times \ddot{x}_{o_{k+1}} \quad (10)$$

Donde $[A]$, $[B]$ son matrices de constantes que dependen de la frecuencia, amortiguamiento, rigidez e intervalo de tiempo y $\ddot{x}_{o_{k+1}}$ es aceleración de piso en el instante $k + 1$ [12] y [18].

2.7.1. Estabilidad del método

Existen dos tipos de métodos dependiendo de la estabilidad de los mismos: condicionalmente estables e incondicionalmente estables [11].

Los procedimientos condicionalmente estables dependen del paso del tiempo y los procedimientos incondicionalmente estables son independientes del paso del tiempo [11].

El método de Newmark con base en la aceleración lineal es condicionalmente estable y debe cumplir con la Ecuación (11), para poder ser aplicado.

$$\frac{\Delta t}{T} < 0,551 \quad (11)$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo y T es el periodo del sistema.

2.8. Análisis modal

Permite calcular la respuesta de la estructura con base en los modos de vibración. Para ello es importante

definir sus propiedades dinámicas: frecuencia, amortiguamiento y formas modales para cada modo [19].

Este análisis es muy útil porque permite descomponer las respuestas de una estructura en modelos de un solo grado de libertad y al combinarlas obtener la respuesta del sistema MDOF.

2.8.1. Frecuencias y modos de vibración

En el sistema amortiguado de múltiples grados de libertad, se debe establecer las frecuencias naturales y las formas modales considerándolo como si se tratase de un sistema sujeto a vibración libre y sin amortiguamiento, por lo cual en la Ecuación (9), los términos de la aceleración de piso y amortiguamiento se anulan, y se obtiene la Ecuación (12).

$$[M] \times \ddot{u} + [K] \times \{u\} = 0 \quad (12)$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se llega a la Ecuación (13), la cual es la base para la resolución del problema de valores y vectores propios [11].

$$([K] - [M] \times \{\omega^2\}) \times \{\phi\} = 0 \quad (13)$$

La Ecuación (13) corresponde a un sistema de ecuaciones simultáneas homogéneas, por definición solo tiene solución no trivial, por tanto, el determinante de la matriz de coeficientes es cero, como se indica en la Ecuación (14) [20].

$$|[K] - [M] \times \{\omega^2\}| = 0 \quad (14)$$

Al expandir el determinante se obtiene un polinomio de orden $2n$ (n : número de modos de vibración), donde ω^2 es la variable. Esta ecuación se la conoce como «ecuación de frecuencias». Las soluciones se denominan valores propios y las raíces cuadradas de estas, corresponde a las frecuencias naturales del sistema ω [21].

Para determinar los vectores propios o modos de vibración ϕ , se sustituye las frecuencias naturales ω en la Ecuación (13) y se resuelve.

2.8.2. Ortogonalidad de los modos

El análisis anterior permite demostrar que los modos de vibración de diferentes frecuencias, cumplen la condición de ortogonalidad, que se muestra a continuación (15) [11].

$$\begin{aligned} \{\phi_i\}^T \times [M] \times \{\phi_j\} &= 0 \\ \{\phi_i\}^T \times [K] \times \{\phi_j\} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$i \neq j$ Donde i, j : modos de vibración

Donde ϕ_i y ϕ_j son formas modales para los modos i y j , $[M]$ matriz de masa y $[K]$ matriz de rigidez.

A partir de ello, se obtiene que el sistema se puede resolver para cada modo de vibración como un sistema separado sin influencia de un modo con respecto al otro, y la respuesta del sistema completo se define con base en la Ecuación (16).

$$\begin{aligned}\{x\} &= \{\phi_1\} \times q_1(t) + \{\phi_2\} \times q_2(t) + \cdots \{\phi_n\} \times q_n(t) \\ \{\dot{x}\} &= \{\phi_1\} \times \dot{q}_1(t) + \{\phi_2\} \times \dot{q}_2(t) + \cdots \{\phi_n\} \times \dot{q}_n(t) \\ \{\ddot{x}\} &= \{\phi_1\} \times \ddot{q}_1(t) + \{\phi_2\} \times \ddot{q}_2(t) + \cdots \{\phi_n\} \times \ddot{q}_n(t)\end{aligned}\quad (16)$$

Donde ϕ_i forma modal, y q , \dot{q} y \ddot{q} son las coordenadas modales de posición, velocidad y aceleración, en el modo i-simo.

Reemplazando la respuesta $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ y $\{\ddot{x}\}$ con base en la suma de los modos y premultiplicando por la matriz de formas modales transpuestas, se obtiene la ecuación (17).

$$\begin{aligned}[\Phi]^T [M] [\Phi] \times \ddot{q}_n + [\Phi]^T [C] \times [\Phi] \times \dot{q}_n + \\ [\Phi]^T \times [K] \times [\Phi] \times q_n = -[\Phi]^T \times [M] \times \{\iota\} \times \ddot{x}_o\end{aligned}\quad (17)$$

Basándose en la Ecuación (17) y la propiedad de ortogonalidad, se puede definir la Ecuación (18) para cada modo de vibración.

$$\begin{aligned}[\phi_n]^T [M] [\phi_n] \times \ddot{q}_n + [\phi_n]^T [C] \times [\phi_n] \times \dot{q}_n + \\ [\phi_n]^T \times [K] \times [\phi_n] \times q = -[\phi_n]^T \times [M] \times \{\iota\} \times \ddot{x}_o\end{aligned}\quad (18)$$

A partir de la Ecuación (18) y con ayuda del método Newmark de aceleración lineal, se obtiene respuestas dinámicas relativas (posición, velocidad y aceleración) en cada instante de tiempo para cada coordenada modal.

2.9. Diseño del programa

2.9.1. Lenguaje del programa MatLab

El programa *ATH Dynamic responses* ha sido desarrollado en el *software* Matlab, el cual es un lenguaje de programación con un entorno de trabajo amigable. Permite trabajar en modo consola (tan solo se presenta resultados con base en expresiones planteadas) y en modo rutina (programas cuyos comandos están codificados y permiten realizar programas y grabarlos) [7] y [22].

La característica más importante de Matlab es que permite un manejo directo de vectores y matrices, además que la codificación no es compleja [7].

El proyecto se realizó en modo rutina, debido a que se ejecutó un programa con comandos codificados y se creó un GUIDE, que permitió mejorar la interfaz gráfica para el usuario.

2.9.2. Programa ATH Dynamic responses

El programa *ATH Dynamic responses* se basa en el método numérico de Newmark considerando aceleración lineal para el cálculo de la respuesta de los sistemas de 1 GDL en el análisis modal.

Dentro del programa se deben ingresar las características geométricas, la rigidez de los parantes y la masa considerada como concentrada en cada piso. Con base en esto se obtienen respuestas dinámicas relativas (posición, velocidad y aceleración) y propiedades modales del modelo físico (frecuencia, modos y porcentaje de masa participativa).

Para comprender la funcionabilidad del programa, en la Figura 7, se indica el diagrama de flujo del mismo.

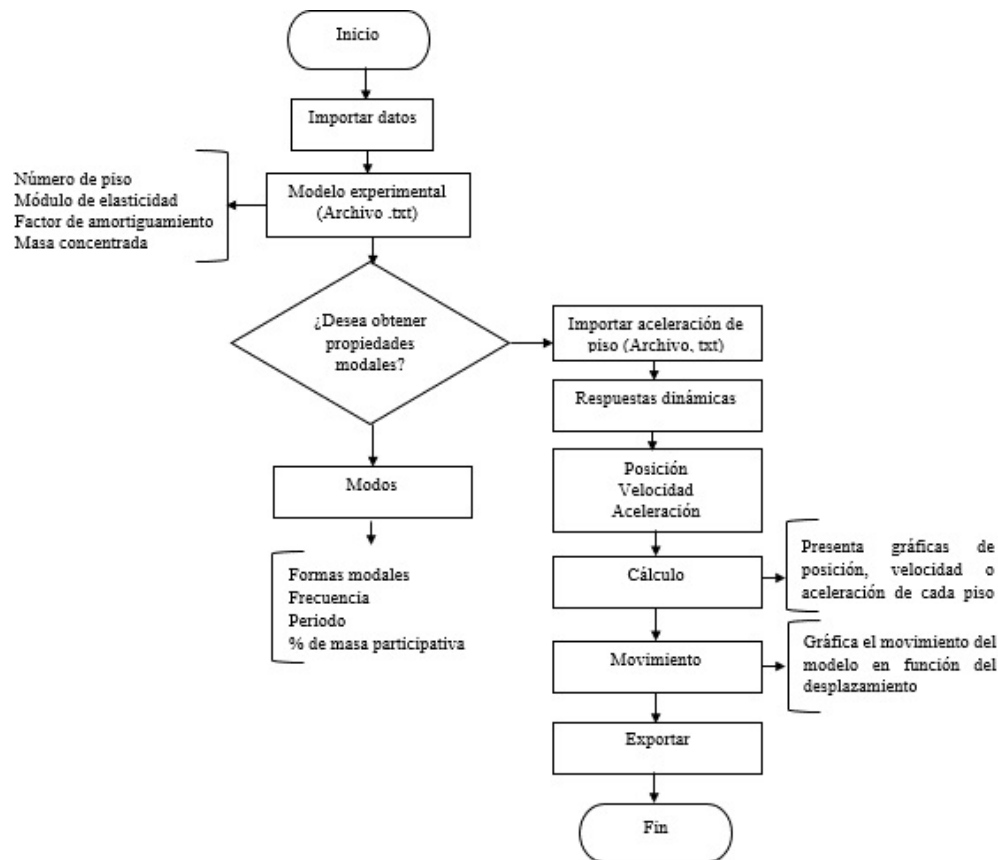


Figura 7. Diagrama de flujo del programa *ATH Dynamic responses*

2.10. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos por los acelerómetros necesitan ser corregidos por línea base y filtrado de frecuencias no deseadas. Para lo cual se utilizó el filtro *butterworth* [23], pasa bajo una frecuencia de corte de 16 Hz. Con este objetivo se ha utilizado el programa AB signal [24].

2.11. Instrumentación

En general, la instrumentación para medir la respuesta dinámica de una estructura, consta de la instalación de sensores que registren respuestas dinámicas (velocidad, aceleración y desplazamiento) [25].

La finalidad de la instrumentación es registrar la respuesta frente al desplazamiento, movimientos internos, sismos y observar el comportamiento de estructuras o modelos [20].

La adquisición de datos del proyecto se efectuó mediante acelerómetros de PCB Piezotronics [25], los cuales tienen frecuencias y sensibilidades que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los acelerómetros

Tipo	Frecuencia	Sensibilidad
Acelerómetro normal	2 Hz – 5 kHz	100 m V/g
Acelerómetro normal	1 Hz – 5 kHz	100 m V/g
Acelerómetro miniatura	1 Hz – 4 kHz	100 m V/g

2.12. Mesa vibratoria (Shake Table II)

El ensayo en una mesa vibratoria es la forma más directa para simular el comportamiento dinámico de las estructuras. Los modelos estarán limitados a no ser muy pesados, de dimensiones escaladas y no muy rígidos [26].

Shake Table II se desarrolló originalmente por la University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST) [6]. Es un dispositivo mecánico, que consta de una placa superior de $45,7 \times 45,7 \text{ cm}^2$ donde se ancla el modelo, una placa inferior de $60,9 \times 45,7 \text{ cm}^2$ y un motor DC con una potencia de 400 W. La mesa soporta una carga de 7,5 kg a una aceleración de

2,5 g y permite movimientos con un recorrido de hasta $\pm 7,62$ cm [6].

2.13. Materiales

El equipo utilizado para la realización del proyecto está conformado por una mesa vibratoria Shake Table II [6] y acelerómetros de PCB Piezotronic [25], descritos en la sección 2.11. y 2.12.

Los modelos experimentales están conformados por acrílicos y acero inoxidable. En las Tablas 2 y 3 se especifican las características y dimensiones de los materiales.

Tabla 2. Especificaciones de los materiales de los parantes y los pisos

Material	Espesor (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	I (m ⁴)	E (kN/m ²)
Parante acero inoxidable	7E ⁻⁴	0,06	0,3	1,715E ⁻¹²	1,80E ⁺¹¹
Piso acrílico	0,01	0,06	0,31		

Tabla 3. Masa de los parantes y pisos

	Material	Masa (g)
Pisos	Acrílico	232-234
Parante modelo 1	Acero inoxidable	102
Parante modelo 2	Acero inoxidable	204
Parante modelo 3	Acero inoxidable	299

En la Figura 8 se presenta los gráficos de los modelos experimentales que se construyeron. En la Figura 9 se indica las dimensiones del modelo 3 y, además, cómo se realizó la concentración de la masa para el modelo teórico, con base en el modelo experimental y en la Figura 10 se puede observar una imagen del modelo real.

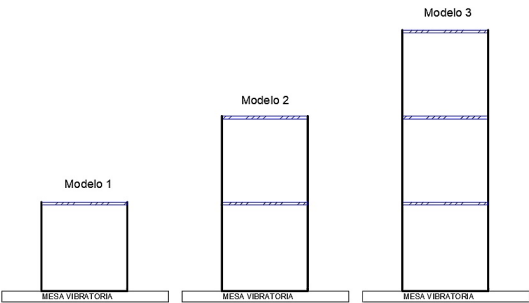


Figura 8. Modelo de uno, dos y tres pisos

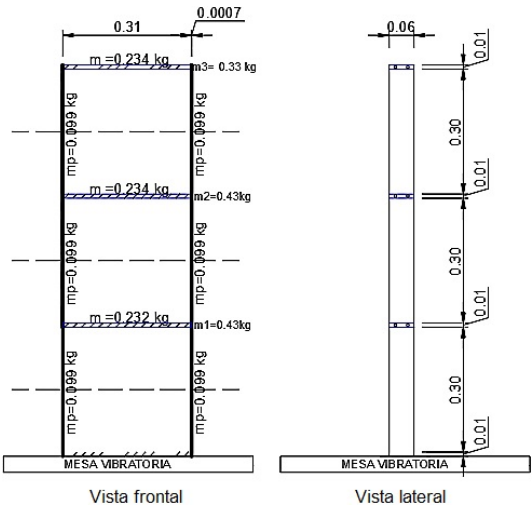


Figura 9. Dimensiones del modelo de 3 grados de libertad y concentración de masa



Figura 10. Modelo experimental del modelo de 3 grados de libertad

3. Resultados y discusión

Los resultados muestran frecuencias, factores de amortiguamiento, aceleraciones absolutas de los modelos experimentales y su comparación con los resultados teóricos proporcionados por el programa *ATH Dynamic responses*.

3.1. Experimento 1. Obtención de frecuencias y factores de amortiguamiento de cada modelo

Las frecuencias se obtuvieron de manera teórica mediante el programa ATH Dynamic responses y verificadas con el *software* SAP2000 [27]. Para la obtención de la frecuencia experimental y el factor de amortiguamiento, se realizó un barrido de frecuencias con la Shake Table II.

Se efectuó el proceso de corrección de línea base y filtrado, como se explicó en la sección 2.10. A partir de ello se utilizó la transformada rápida de Fourier disponible en Matlab [23] y se obtuvo gráficas de transmisibilidad *vs.* frecuencia como se muestran en las Figuras 11, 12 y 13, donde a la abscisa de cada pico del

gráfico le corresponde la frecuencia de cada modo y, además, permite obtener el factor de amortiguamiento aplicando la Ecuación (8). El error porcentual en la frecuencia analítica que se obtuvo es con respecto a la aceleración experimental.

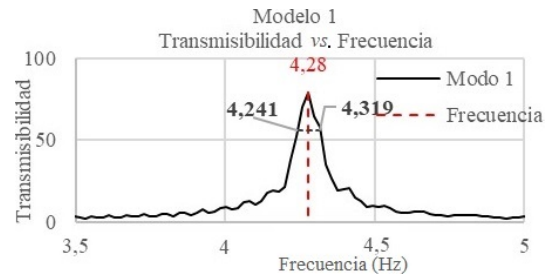
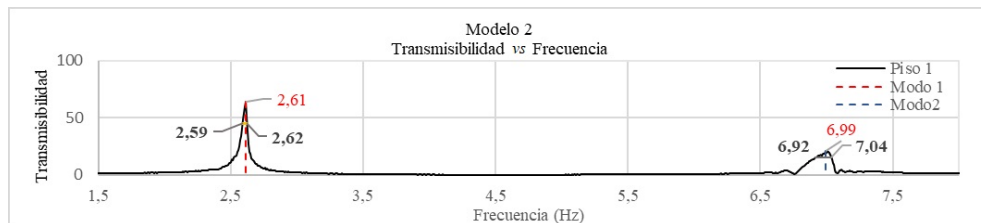
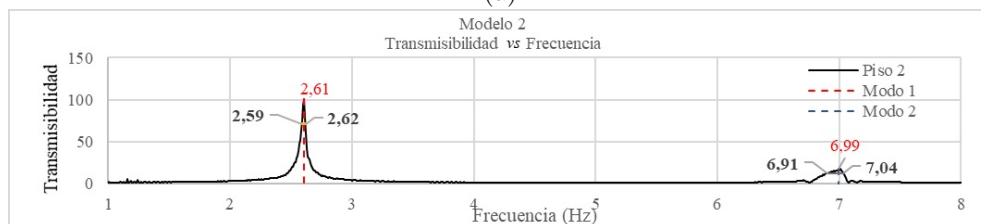


Figura 11. Frecuencia y ancho de banda del modelo 1

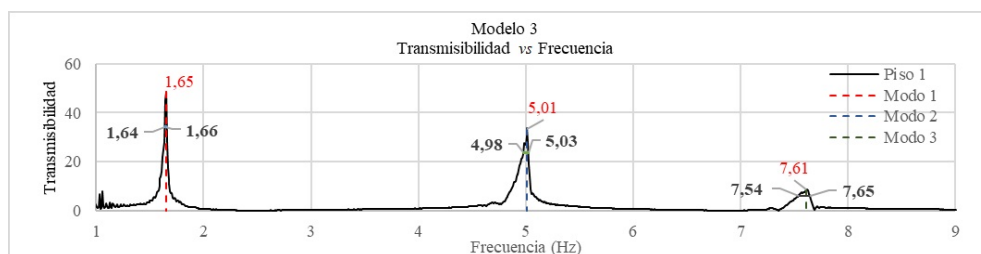


(a)

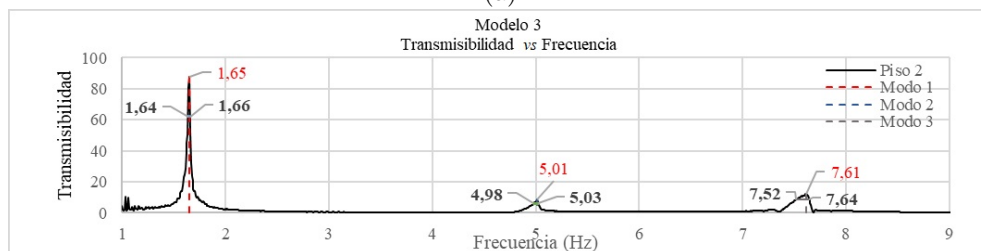


(b)

Figura 12. Frecuencia y ancho de banda del modelo 2 (a) piso 1 y (b) piso 2



(a)



(b)

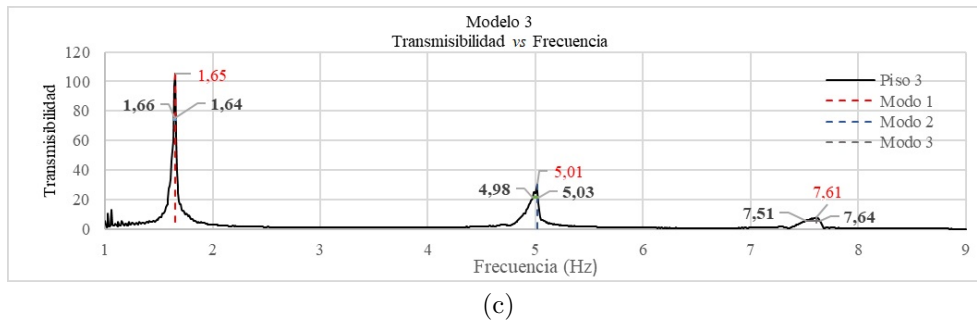


Figura 13. Frecuencia y ancho de banda del modelo 3 (a) piso 1, (b) piso 2 y (c) piso 3

3.1.1. Frecuencias y factor de amortiguamiento del modelo 1

En la Figura 11 se muestran las gráficas que permitieron obtener la frecuencia teórica y el factor de amortiguamiento, y en la Tabla 4 se tabulan estos valores.

El *peak* de la Figura 11 muestra que la frecuencia experimental para el modelo 1 es 4,28 Hz.

Tabla 4. Frecuencia y amortiguamiento modelo 1

Modo	ATH Dynamic responses	Exp.	Amortiguamiento	
	f (Hz)	f (Hz)	% error	ξ (%)
1	4,58	4,28	6,55	1,44

3.1.2. Frecuencias y factor de amortiguamiento del modelo 2

En las Figuras 12 (a) y (b) se muestran las gráficas que permitieron obtener las frecuencias y los factores de amortiguamiento para los dos modos y en la Tabla 5 se presentan los resultados.

Los picos de las Figuras 12 (a) y (b) son la frecuencia experimental, para el modo 1 es 2,61 Hz y para el modo 2 es 6,99 Hz.

Tabla 5. Frecuencia y amortiguamiento modelo 2

Modo	ATH Dynamic responses	Exp.	Amortiguamiento	
	f (Hz)	f (Hz)	% error	ξ (%)
1	2,61	2,60	0,38	0,57
2	6,53	6,99	7,07	0,85

3.1.3. Frecuencias y factor de amortiguamiento del modelo 3

En la Figura 13 (a), (b) y (c) se muestran las gráficas que permitieron obtener las frecuencias, los factores de amortiguamiento para los 3 modos y en la Tabla 6, se presentan los resultados.

Los picos de las Figuras 13 (a), (b) y (c), son las frecuencias experimentales, para el modo 1 es

1,65 Hz, para el modo 2 es 5,01 Hz y para el modo 3 es 7,61 Hz.

Tabla 6. Frecuencia y amortiguamiento modelo 3

Modo	ATH Dynamic responses	Exp.	Amortiguamiento	
	f (Hz)	f (Hz)	% error	ξ (%)
1	1,91	1,65	13,61	0,55
2	5,25	5,01	4,57	0,49
3	7,36	7,6	3,26	0,85

3.2. Experimento 2. Respuesta dinámica del modelo a aceleración de piso

La respuesta dinámica se obtuvo al someter a los modelos experimentales a un registro sísmico escalado. El registro sísmico que se utilizó fue El Centro y su escalamiento se realizó mediante el *software* de la Shake Table II; el escalado del registro fue sobre la base de un desplazamiento máximo de 4 cm.

Los resultados que se presentan a continuación son de aceleraciones absolutas, debido a que estas son las que proporcionan directamente los acelerómetros y se compararon con las aceleraciones absolutas obtenidas del programa ATH Dynamic response, con base en la Ecuación (19):

$$\ddot{x} = \ddot{u} + \ddot{x}_o \quad (19)$$

Donde \ddot{x} es aceleración absoluta, \ddot{u} es aceleración relativa y \ddot{x}_o aceleración de base.

3.2.1. Modelo 1 registro de aceleración en base: sismo El Centro

En la Figura 14, se muestra la aceleración experimental y la aceleración teórica del modelo de 1 piso, y en la Tabla 7, las aceleraciones máximas teóricas y experimentales.

Tabla 7. Aceleraciones máximas modelo 1

Aceleración (m/s ²) Piso 1		
Teórico	Experimental	% error
8,707	7,657	13,711

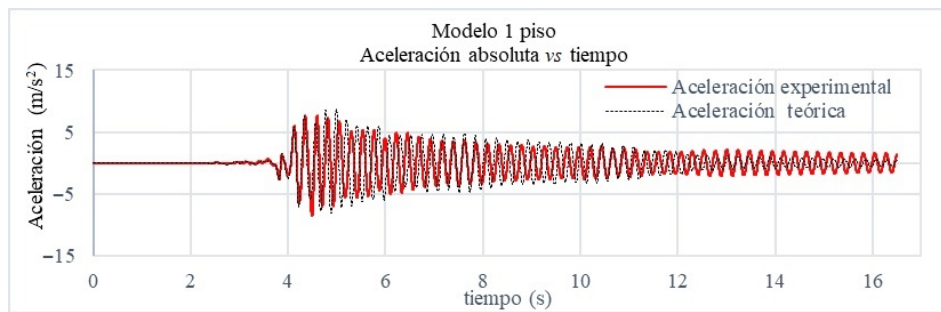


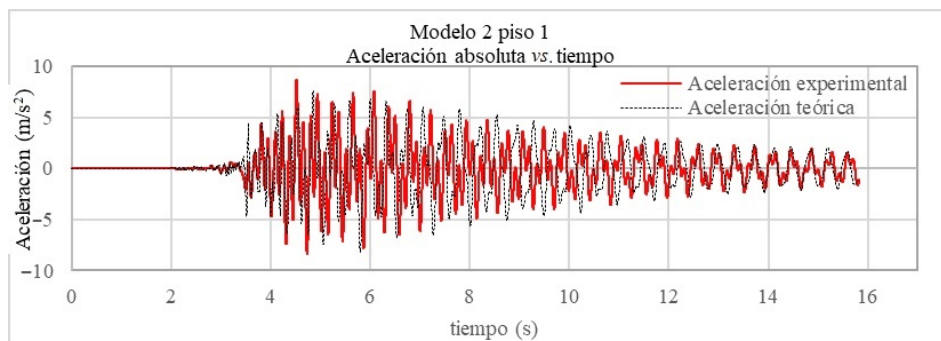
Figura 14. Aceleración absoluta experimental y teórica del modelo 1, con aceleración en la base del sismo El Centro

3.2.2. Modelo 2 aceleración base: sismo El Centro

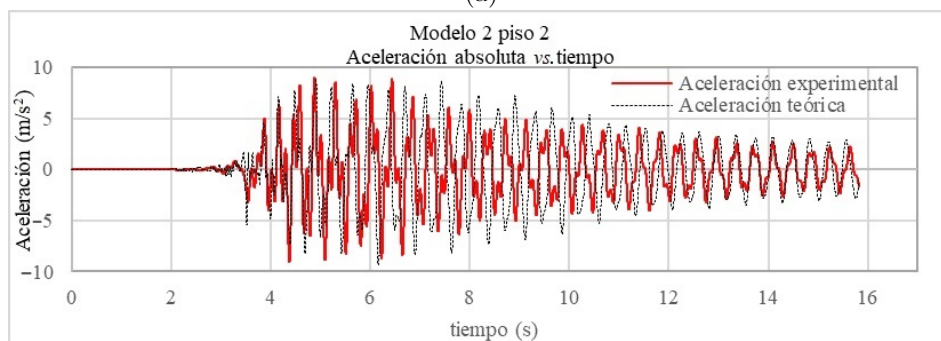
En las Figuras 15 (a) y (b) se muestra la aceleración experimental y la aceleración teórica del modelo 2 y en la Tabla 8 las aceleraciones máximas teóricas y experimentales.

Tabla 8. Aceleraciones máximas modelo 2

	Aceleración (m/s ²)		
	Teórico	Experimental	% error
Piso 1	7,585	8,678	12,586
Piso 2	8,989	9,021	0,353



(a)



(b)

Figura 15. Aceleración absoluta experimental y teórica del modelo 2, con aceleración en la base del sismo El Centro (a) piso 1 (b) piso 2

3.2.3. Modelo 3 aceleración base: sismo El Centro

En las Figuras 16 (a), (b) y (c) se muestra la aceleración experimental y la aceleración teórica del modelo 3 y en la Tabla 9 las aceleraciones máximas teóricas y experimentales.

Tabla 9. Aceleraciones máximas modelo 2

	Aceleración (m/s ²)		
	Teórico	Experimental	% error
Piso 1	5,225	5,033	3,824
Piso 2	5,297	5,698	7,043
Piso 3	5,967	5,845	2,095

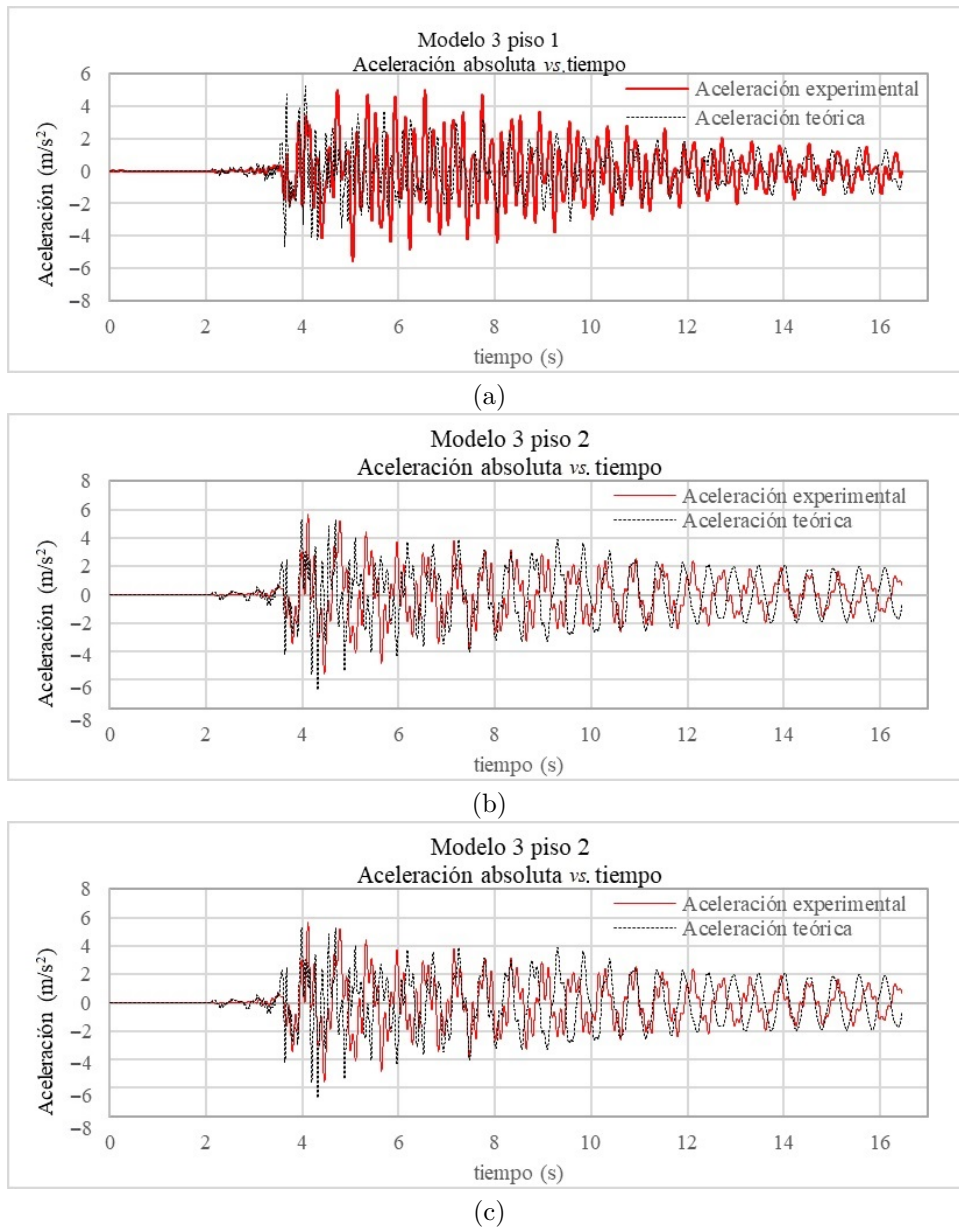


Figura 16. Aceleración absoluta experimental y teórica del modelo 3, con aceleración en la base del sismo El Centro (a) piso 1 (b) piso 2 (c) piso 3

Al comparar gráficamente los modelos, se observó que la aceleración experimental tiene mayor amplitud en la mayoría de los casos, sin embargo, de manera general las gráficas experimental y teórica son semejantes en su forma.

4. Conclusiones

Con base en los resultados de la experimentación y los resultados teóricos de los modelos, se puede argumentar que el método para la obtención de frecuencias con el uso de la transformada de Fourier, es adecuado debido a que los resultados son semejantes entre frecuencias experimentales y teóricas.

El factor de amortiguamiento obtenido mediante el ancho de banda es coherente en cuanto a los valores obtenidos por piso, debido a que cada piso proporcionó valores similares de factores de amortiguamientos por modo y dichos factores fueron útiles para la modelación teórica, y así poder obtener la matriz de amortiguamiento y las respuestas dinámicas.

La modelación experimental del modelo, nos ayudó a observar de manera real cómo se comporta un modelo ante la aplicación de una aceleración sinusoidal o aceleración de un sismo escalado, y permitió verificar los valores obtenidos analíticamente respecto de los experimentales.

Como trabajo futuro se puede implementar la obtención de propiedades dinámicas de sistemas tridimensionales que presenten irregularidad en planta y elevación.

Se puede observar un desfase entre las respuestas experimentales y las teóricas en cuanto a las aceleraciones absolutas, a causa de la consideración del tiempo 0, en que los modelos experimentales estaban en estado de reposo.

Referencias

- [1] INEC, *Reconstruyendo las cifras luego del sismo. Memorias*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Ecuador, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gEu4Al>
- [2] Instituto Geofísico. (2020) Cuatro años después del terremoto de Pedernales: un testimonio sobre el peligro sísmico en el Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dW198V>
- [3] MIDUVI, *Norma ecuatoriana de la construcción. NEC-SE-DS. Cargas Sísmicas. Diseño Sismoresistente*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Ecuador, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xpr2FY>
- [4] D. Gutiérrez Calzada, *Sistema de múltiples grados de libertad. Análisis modal espectral*. Universidad Autónoma del Estado de México. México, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dSSQe2>
- [5] D. Henao Ángel, "Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral," Master's thesis, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sQd7Fu>
- [6] QUANSER, "SHAKE TABLE II bench-scale single-axis motion simulator," QUANSER INNOVATE EDUCATE, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tWivbj>
- [7] J. E. Hurtado Gómez, *Introducción de la dinámica de estructuras*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, 2000. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ezgOKC>
- [8] B. A. Guaygua Quillupangui, V. N. Colcha Guachamín, and E. L. Tibán Guacolante, "Estudio comparativo del comportamiento dinámico de modelos estructurales teóricos y modelos estructurales experimentales," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gJDR8i>
- [9] P. X. Villalba Nieto, A. I. Cepeda Aveiga, and N. A. Hipocuro Simbaña, "Análisis de las frecuencias fundamentales de modelos estructurales con excitaciones sísmicas," 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dXrBio>
- [10] L. W. Morales Gubio, P. E. Chimarro Quishpe, and M. G. Coronel Armas, "Análisis de una estructura de un edificio de 9 piso a escala en Quito, sometido a cargas sísmicas en la mesa de vibración," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/32Ts5A4>
- [11] A. K. Chopra, *Dinámica de Estructuras*. Pearson Educación de México, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dROhkd>
- [12] Y. Bai and Z.-D. Xu, *Structural Dynamics for Structural Engineers*. John Wiley & Sons, Inc., 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tYARsf>
- [13] R. R. Craig and A. J. Kurdila, *Fundamentals of Structural Dynamics*. John Wiley & Sons, Inc., 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/2S6J6EK>
- [14] O. Möller, M. Rubinstein, and J. P. Ascheri, "Análisis del amortiguamiento proporcional a la rigidez tangente en sistemas dinámicos no lineales," *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. XXX, no. 14, pp. 1277–1293, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3evo9L8>
- [15] D. J. Inman, *Vibration with Control*. John Wiley & Sons, Inc., 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3vidqKE>
- [16] R. Boroschek and F. Hernández, "Corrección de sobreestimación del amortiguamiento en el método de ancho de banda del espectro de potencia," in *X Chilean Conference of seismology and earthquake engineering. ACHISINA*, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/32Uy2wp>
- [17] M. Paz, *Dinámica estructural teoría y cálculo*. Editorial Reverté, 1992. [Online]. Available: <https://bit.ly/32Pw94l>
- [18] P. L. Sierra, O. Möller, J. P. Ascheri, and M. Poliotti, "Dinámica estructural, comparación y análisis de la propagación de vibraciones en estructuras," in *XXIII Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2017)*, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/32Wc780>
- [19] M. Rodríguez, "Análisis modal operacional: Teoría y práctica," 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gPU5wm>
- [20] H. Garzón Molano, "Instrumentación geotécnica. aplicación y soporte para la toma de decisiones," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aF31Ru>
- [21] L. E. García Reyes, *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia, 1998.

-
- [22] R. Aguiar Falconi, *Dinámica de estructuras con MatLab*. Centro de Investigación Científica, CEINCI – Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dU0d1C>
- [23] MathWorks. (2021) Matlab para inteligencia artificial. 1994-2021 The MathWorks, Inc. [Online]. Available: <https://bit.ly/2S9ay4I>
- [24] B. D. Erazo Silva and P. A. Vargas Yépez, “Desarrollo de un software para procesamiento y corrección de registros, y generación de espectros de respuesta sísmica,” 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3u0ZAFB>
- [25] DataLights. (2020) Soluciones de control e iluminación. Datalights, Cia. Ltda. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aH2T3U>
- [26] L. Bustos, F. Zabala, J. Santalucía, and A. Masanet, “Estudio del comportamiento dinámico de un modelo de mampostería encadenada mediante un ensayo en mesa vibratoria,” in *JUBILEO, XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Argentina*, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2QZYP7W>
- [27] Computers and Structures. (2021) Sap 2000 computer software for structural and earthquake engineering. [Online]. Available: <https://bit.ly/2S75M7Q>



INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE CROMATO DE ZINC EN LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS ASTM A-500 Y A-500 GALVANIZADO EXPUESTOS EN UNA CÁMARA DE NIEBLA SALINA

INFLUENCE OF THE ZINC CHROMATE COATING ON THE CORROSION OF ASTM A-500 AND GALVANIZED A-500 STEEL EXPOSED INTO A SALT FOG CORROSION CHAMBER

Cristian Guilcaso^{1,*} , Leonidas Ramírez² , Augusto Coque³ , Xavier Vaca² ,
 Diego Molina¹ , Isaac Simbaña²

Recibido: 13-11-2020, Recibido tras revisión: 04-02-2021, Aceptado: 09-03-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

En esta investigación se ha analizado la influencia del recubrimiento de cromato de zinc en la corrosión del acero ASTM A-500 y A-500 galvanizado expuesto en una cámara de niebla salina acorde a la norma ASTM B117. Se realizaron dos métodos de limpieza superficial antes de la aplicación del recubrimiento, según las normas SSPC-SP-3 y SSPC-SP-5, una limpieza mecánica y otra con chorro presurizado. Las probetas se introdujeron en la cámara con tiempos de exposición de 200, 250 y 350 h. Se utilizaron diferentes equipos para registrar información que fue utilizada en el cálculo de la velocidad de corrosión. Con evaluaciones visuales, utilizando las normas ASTM D-610 y ASTM D-714, se determinó el grado de corrosión de las probetas y la frecuencia de ampollas, respectivamente. Se comparó los materiales sin recubrimiento y los dos métodos de limpieza superficial. Los resultados obtenidos han demostrado que el acero galvanizado presentó una menor velocidad de corrosión.

Palabras clave: ASTM-500, recubrimientos anticorrosivos, cámara de niebla salina

Abstract

In this research work it has been analyzed the influence of the Zinc chromate coating on the corrosion of ASTM A-500 and galvanized A-500 steels exposed in a salt spray corrosion chamber, according to the ASTM B117 Standard. Two surface cleaning methods were used prior to applying the coating, considering the SSPC-SP-3 and SSP-SP-5 standards, namely a mechanical cleaning and a blast cleaning. The samples were put into the chamber with exposure times of 200, 250 and 350 h. Different equipment were used for recording the information that was used to calculate the corrosion rate. Through visual assessments according to the ASTM-D610 and ASTM D-714 standards, the corrosion degree and the blistering frequency, respectively, were determined. The materials without coating and coated after the two surface cleaning methods were compared. The results obtained have demonstrated that galvanized steel exhibited a lower corrosion rate.

Keywords: ASTM-500, anticorrosive coatings, salt spray corrosion chamber

^{1,*}Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: erojas@ups.edu.ec.

²Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

³Carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Guilcaso, C.; Ramírez, L.; Coque, A.; Vaca, X.; Molina, D. y Simbaña, I. (2021). «Influencia del recubrimiento de cromato de zinc en la corrosión de los aceros ASTM A-500 y A-500 galvanizado expuestos en una cámara de niebla salina». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2020.06>.

1. Introducción

El acero ASTM A-500, como tubo rectangular o circular, es comúnmente utilizado para la industria de la construcción, así como en la automotriz, debido a sus propiedades mecánicas y facilidades en la soldadura [1]. Este acero puede ser tratado de diferentes métodos de acuerdo con lo que se requiera, por ejemplo, aumentando la ductilidad al reducir la resistencia. Una aplicación común del acero es para la fabricación de carrocerías de vehículos, automóviles e incluso camiones, de carga y transporte público. El diseño de la carrocería de un vehículo de transporte público se debe realizar considerando el peor escenario ante una colisión y en donde se debe reducir la severidad del accidente para los pasajeros y conductor [2]. Uno de los principales agentes que puede generar fallas de deformación y ruptura es la corrosión, ya que afecta la estructura del acero y, por lo tanto, sus propiedades mecánicas. La aplicación de un recubrimiento anticorrosivo puede prolongar la vida útil de un elemento estructural. Sin embargo, debe aplicarse correctamente, caso contrario, se puede acelerar la corrosión al presentar deslamina-ciones o ampollas. La corrosión genera una pérdida de masa, principalmente en la reducción del área de la sección transversal y aunque sea muy baja, puede reducir la resistencia del material y llegar a generar una falla [3, 4].

El tratamiento más común utilizado como anti-corrosivo es el galvanizado, ya que el Zn provee una protección catódica al acero evitando daños producidos por el óxido, además, es un elemento de bajo costo. Mediante un recubrimiento galvanizado electroquímicamente, un acero mejora su resistencia a la corrosión e incluso sus propiedades mecánicas al modificar ligeramente su composición [5]. El Zn presenta propiedades reciclables y no tóxicas, es por esto por lo que se utilizan más de cinco millones de toneladas por año en aplicaciones anticorrosivas, generando un ahorro de alrededor de USD 2200 millones por reparaciones o reemplazos de elementos oxidados [6].

Para mejorar la resistencia a la corrosión de un acero inmerso en Zn, se pueden añadir diferentes elementos considerando el contenido apropiado. Kania *et al.* [7] caracterizaron la microestructura y analizaron la resistencia corrosiva de un recubrimiento de Zn obtenido en una inmersión de Zn-AlNiBi. Los autores utilizaron acero de bajo contenido de Si, 0,021 %, en muestras de $50 \times 100 \times 2$ mm sumergidas por 180 s en la solución estudiada, a 450 °C. Las muestras se introdujeron en una cámara de niebla salina (CNS) con NaCl al 5 % a una temperatura de 35 ± 2 °C y pH entre 6,8 a 7,2, desde 24 hasta 1000 h. La masa de las muestras fue medida cada 24 h y los resultados indican que este nuevo recubrimiento es mejor agente anticorrosivo que el Zn puro, ya que la presencia de corrosión se redujo en un 30 %, teniendo como

masas finales 140,34 y 108,24 g/m², respectivamente. Al inspeccionar el recubrimiento, se aprecia Bi en la superficie, pero no se visualiza Al o Ni, por esto, los autores recomiendan utilizar el Bi como aditivo en lugar del Pb que es ambientalmente perjudicial.

Previo a considerar un recubrimiento a gran escala para ser aplicado en el sector industrial, deben llevarse a cabo varias pruebas experimentales y la alternativa de mayor viabilidad para analizar la velocidad de corrosión es mediante una CNS. Vera *et al.* [8] evaluaron recubrimientos anticorrosivos en acero expuesto a un ambiente marino, comparando pruebas de campo con una corrosión acelerada. Se utilizó acero A-36 de $100 \times 100 \times 3$ mm limpiado con chorro y aplicando un recubrimiento alto en Zn y otro de esmalte epóxico. Las pruebas en mar fueron en Chile durante 24 meses y se recolectó SO₂ para disolverlo en Na₂CO₃ al 5 %. La pérdida de espesor estuvo entre 71,9 a 222,2 µm, dependiendo de las condiciones climáticas, por lo que se estimó una velocidad de corrosión de 131,4 µm/año. Mediante un algoritmo, los autores llegaron a determinar que las condiciones similares en una CNS se deben realizar a 37 °C, con un 100 % de humedad y NaCl al 3,5 % durante 3000 h de exposición (125 días), reduciendo el tiempo en 6 veces.

La electrodeposición de Zn nanocristalino en acero para mejorar su resistencia a la corrosión fue analizada por Li *et al.* [6]. El experimento utilizó solución NaCl al 3,5 % y la electrodeposición se realizó con un baño de ZnSO₄ con un acero de bajo carbono, después se lavaron las muestras y se secaron. Mediante un microscopio de barrido electrónico (SEM, por sus siglas en inglés), se visualizó que el grano de óxido se redujo de 5 µm a 40 nm, por lo que la aplicación de este recubrimiento aumentó casi en 40 veces la resistencia a la corrosión.

Stojanović *et al.* [9] evaluaron la protección a la corrosión de un sistema de dos recubrimientos en un ambiente marino simulado. Placas de acero naval de $120 \times 70 \times 3$ mm fueron limpiadas con chorro para aplicar dos capas de recubrimiento anticorrosivo de 150 µm cada una y posteriormente un recubrimiento antiincrustante. Las placas fueron expuestas durante 1440 h en una CNS al 38,08 % y un pH de 8, donde se seleccionó dos grupos, unos para inmersión y otro para agitación. Los resultados indican que las placas que fueron agitadas en la solución generan mayor microorganismos y como resultado, una mayor corrosión, además que el segundo recubrimiento no tuvo la adherencia adecuada, por lo que los autores recomiendan analizar la composición química de los recubrimientos anticorrosivos.

El comportamiento corrosivo del acero ASTM-SA213-T22 recubierto con Cr₂O₃ en un ambiente salino a 700 °C fue analizado por Goyal *et al.* [10]. Las muestras fueron de $22 \times 15 \times 3$ mm y recubiertas con Cr₂O₃ comercial con un espesor entre 250 a 255 µm.

Se utilizó un horno para generar corrosión en caliente con Na_2SO_4 al 60 % durante 1 h y se consideró la masa final de las muestras. El material base presentó una mayor velocidad de corrosión comparado con el recubrimiento de Cr_2O_3 que presentó una perfecta adherencia, generando que la masa del material permaneciera en un 94,5 %.

Esta investigación está dirigida a determinar la influencia de un recubrimiento de cromato de zinc en la corrosión de los aceros ASTM A-500 y A-500 galvanizado, acero utilizado en la fabricación de carrocerías de vehículos de transporte público. De esta manera, se va a establecer si se requiere este tratamiento previo. La sección de Materiales y métodos describe los pasos del proceso experimental considerando diferentes normas para su realización. En Resultados se presentan figuras y el análisis comparativo de las muestras después de la exposición a la CNS. Finalmente, las Conclusiones explican los resultados obtenidos y definen cuál acero tuvo menor corrosión.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 resume el procedimiento considerado para el desarrollo experimental y obtención de resultados de esta investigación.

2.1. Preparación del material

El material utilizado fue un tubo de acero al carbono ASTM A-500 obtenido mediante soldadura en frío y sin cordón, utilizado para la fabricación de carrocerías. Mediante una matriz de diseño experimental, se estableció que se requieren ocho probetas de cada material, para ello, fueron cortadas mediante disco abrasivo utilizando una amoladora y así conseguir placas de $100 \times 50 \times 2$ mm.

2.2. Limpieza superficial

La Sociedad de Recubrimientos Protectores, (SSPC, por sus siglas en inglés) ha normado ciertos procedimientos de limpieza superficial requeridos antes de la aplicación de un recubrimiento anticorrosivo. Para esta investigación, se ha optado por dos métodos de limpieza superficial, el primero consiste en una limpieza mecánica, de acuerdo con la norma SSPC-SP-3 [11], utilizando lijas para remover capas de óxido. Posteriormente, se requiere de un cepillo de alambre rotativo como herramienta eléctrica para limpiar la superficie y remover todos los restos de escombros. Es importante mencionar que, debido a la geometría tanto del material, así como de las herramientas, es probable que puedan quedar desechos ocultos en las irregularidades del material.

Para el segundo método de limpieza superficial, se consideró la norma SSPC-SP-5 [12] que consiste en la

aplicación de un líquido presurizado para remover todas las partículas sobre la superficie del material. Este método asegura una limpieza total, libre de deslaminaciones, ya que un chorro presurizado permite retirar incluso polvo y grasa, y así lograr una mejor adherencia del recubrimiento.

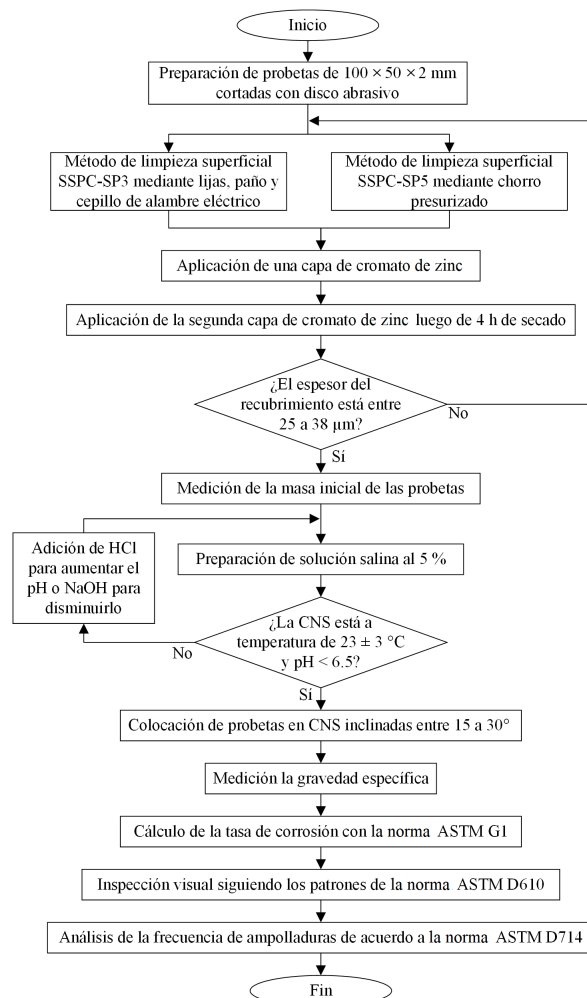


Figura 1. Diagrama de flujo para el desarrollo experimental

2.3. Recubrimiento

Un recubrimiento de cromato de zinc se aplicó sobre las ocho probetas de A-500 y acero galvanizado, cuatro a ser limpiadas mediante SSPC-SP-3 y las otras cuatro con SSPC-SP-5. Este recubrimiento consta de resinas y pigmentos que proveen resistencia corrosiva ante los diferentes agentes atmosféricos, además, es uno de los más utilizados comercialmente.

El recubrimiento fue diluido en *thinner* en una proporción de 4 a 1 para su aplicación mediante soplete. El espesor del recubrimiento según el fabricante debe estar entre 25 a 38 µm, por lo cual se aplicaron dos capas, con un tiempo de secado de 4 h a 20 °C

entre ellas. Para realizar la medición del espesor del recubrimiento, se utilizó un medidor de espesor de revestimientos Elecometer 456.

2.4. Ensayo en la CNS

La norma ASTM B-117 [13] se utilizó para la experimentación en la CNS, donde se indica la preparación, procedimientos, predicción y resultados bajo un ambiente corrosivo controlado. Se utilizó solución salina al 5 %, con 12,72 kg de NaCl en un volumen de 240 litros de agua destilada.

Entre los instrumentos de medida que se utilizaron, es importante mencionar el medidor de pH a prueba de agua HANNA HI9125, para verificar que el pH fuera menor a 6,5 a una temperatura promedio de 23 °C. Si el valor de pH baja, se puede añadir NaOH, caso contrario, cuando el pH es alto, se añade HCl hasta obtener el valor requerido. Mediante un medidor de flujo, se recolectó 2 ml/h de NaCl de la CNS cada 24 horas. Un refractómetro digital MA887 como medidor de salinidad se utilizó para determinar la gravedad específica del NaCl. La masa de las probetas, de material base y con el recubrimiento, se midió previo a ingresarlas a la CNS, donde fueron colocadas con una inclinación de 20 a 30°.

Para el recubrimiento de cromato de zinc, el tiempo promedio para este ensayo se estima en 250 h. Se establecieron diferentes tiempos de exposición dentro de la CNS, teniendo 200, 250 y 350 h para determinar cómo influye este tiempo de exposición en la corrosión del acero. Después de cada período, se tomó la medida del peso de las probetas nuevamente, así calcular la pérdida de masa entre el valor inicial y el final.

2.5. Velocidad de corrosión

Según la norma ASTM G-1 [14], este parámetro se define como la pérdida de espesor de un acero por unidad de tiempo para analizar el daño ocasionado por corrosión después de la exposición. La velocidad de corrosión (\dot{C}) depende del material, así como del tiempo de exposición, y puede ser obtenida mediante:

$$\dot{C} = (K \cdot W) \cdot (A \cdot t \cdot \delta)^{-1} \quad (1)$$

Donde K permanece constante con un valor de $8,76 \times 10^4$ mm/año, W es la pérdida de masa expresada en g, A es el área de la probeta en cm^2 , t son las horas de exposición y δ es la densidad del acero en g/cm^3 .

2.6. Evaluación visual

Para evaluar el grado de corrosión sobre una superficie recubierta, se consideró la norma ASTM D-610 [15] para determinar si el recubrimiento debía ser reparado o reemplazado. Según esta norma, se ha establecido

una escala desde 1 a 10 en función del área superficial de corrosión, donde 10 se indica para manchas de óxido que son 0,01 % menores al área total, mientras que si el área corroída es mayor al 33 %, se designa 1. Este número debe ir acompañado de una letra para indicar el patrón visual de corrosión, manchado (S), puntual (P) o general (G).

Esta evaluación visual es consolidada con una segunda inspección, que consiste en evaluar las ampollas producidas por corrosión sobre el recubrimiento según la norma ASTM D-714 [16]. Para la identificación de ampollas, se ha asignado un número entre 0 a 10, donde 10 es una superficie sin imperfecciones, 8 indica pequeñas ampollas difíciles de apreciar a simple vista y los números inferiores indican ampollas cada vez más grandes. Además, este número va acompañado de una letra que representa la frecuencia de presencia de ampollas por unidad de área, indicando si esta frecuencia es poca (F), media (M), media densa (MD) o densa (D).

3. Resultados y discusión

3.1. Velocidad de corrosión

Al considerar la diferencia entre la masa inicial y final de las probetas, se pudo calcular la corrosión por año. A continuación, se presentan los valores de velocidad de corrosión obtenidos mediante la Ecuación (1) para el material base y las probetas con los métodos de limpieza superficial SSPC-SP-3 y SSPC-SP-5.

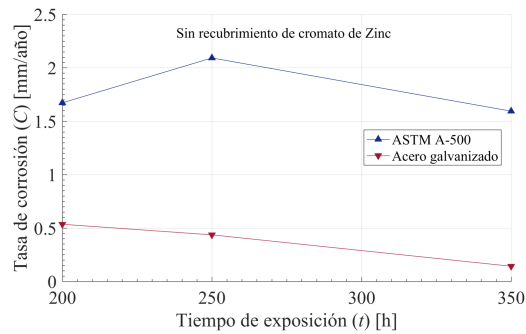
Las probetas de acero ASTM A-500 y el acero galvanizado sin el recubrimiento de cromato de zinc presentaron una velocidad de corrosión de 1,672 y 0,535 mm/año luego de 200 h de exposición en la CNS, como se muestra en la Figura 2a. Mientras que con la limpieza mecánica SSPC-SP-3, los valores fueron de 0,129 y 0,044 mm/año para el A-500 y el acero galvanizado, respectivamente, con el mismo tiempo de exposición. Finalmente, para las probetas de A-500 y acero galvanizado que fueron limpiadas a chorro según la norma SSPC-SP-5, se tuvo una velocidad de corrosión de 0,051 y 0,034 mm/año. Los valores de velocidad de corrosión tienden a incrementarse a medida que el tiempo de exposición aumenta, sin embargo, el óxido sobre la superficie de las probetas puede crear un recubrimiento adicional y este valor puede disminuir.

Después de 250 h de exposición, las probetas de A-500 con los métodos de limpieza superficial y recubrimiento de cromato de zinc disminuyeron el valor de la velocidad de corrosión, teniendo 0,083 y 0,014 mm/año para los métodos SP-3 y SP-5, respectivamente, mientras que el material base aumentó su corrosión a 2,092 mm/año. Con el mismo tiempo de exposición, el acero galvanizado presentó resultados opuestos, donde el material base redujo su corrosión a 0,436 mm/año y los métodos SP-3 y SP-5 se incre-

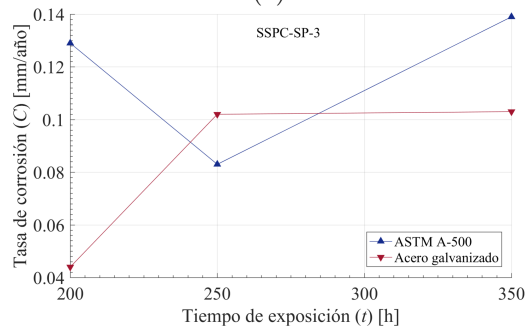
mentaron en 0,058 y 0,002 mm/año, respectivamente, con respecto a la exposición de 200 h.

Finalmente, con un tiempo de exposición de 350 h, las probetas de material base de A-500 y acero galvanizado tuvieron una corrosión de 1,594 y 0,142 mm/año. Para la limpieza superficial SSPC-SP-3, estos aceros presentaron una velocidad de corrosión de 0,139 y 0,103 mm/año, respectivamente. Además, por el método de limpieza superficial SP-5, las probetas registraron valores de 0,033 y 0,029 mm/año para el A-500 y el acero galvanizado, respectivamente.

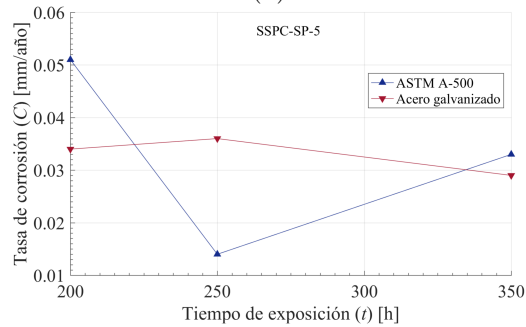
Los valores obtenidos están más agrupados con la limpieza mediante SSPC-SP-5, teniendo una desviación estándar de 0,0185 y 0,0036 mm/año para el A-500 y el acero galvanizado, respectivamente. Estos aceros presentaron una desviación estándar con el método SSPC-SP-3 de 0,0299 y 0,03378 mm/año, respectivamente, además, 0,2679 y 0,2044 mm/año sin tratamiento.



(a)



(b)

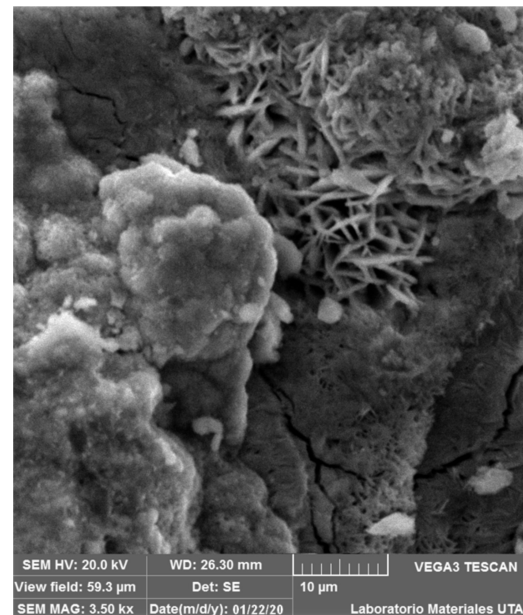


(c)

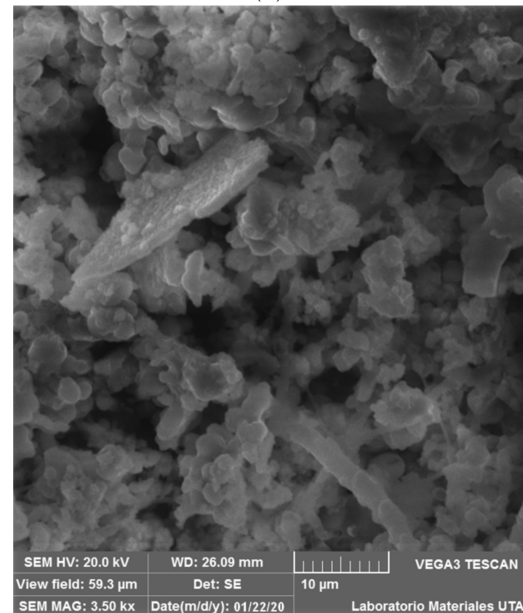
Figura 2. Velocidad de corrosión para probetas a) sin recubrimiento, b) limpieza SSPC-SP-3, c) limpieza SSPC-SP-5

3.2. Evaluación visual

Mediante un microscopio SEM, se visualizó la morfología de los productos de corrosión en las probetas de A-500. En la Figura 3a, se muestra una probeta sin recubrimiento expuesta a 300 h, observando una formación generada por la corrosión que se conoce como lepidocrocita. La Figura 3b presenta el análisis de morfología de la probeta con un tiempo de exposición de 350 h, donde se identifica goetita semicristalina en forma de nubes, así como láminas muy delgadas de lepidocrocita, con un contorno similar a raíces.



(a)



(b)

Figura 3. Microestructura del acero ASTM A-500 sin recubrimiento expuesto en la CNS a) 300 h, b) 350 h

La Figura 4a indica los resultados de la corrosión existente en el ASTM A-500, mientras que en la Figura 4b se aprecia el acero galvanizado corroído, luego de 200, 250 y 350 h de exposición en la CNS. Los aspectos que presentan las probetas son de superficies con mucha corrosión, visible a simple vista, e incluso con cúmulos significativos, corroborando los valores calculados en la velocidad de corrosión.

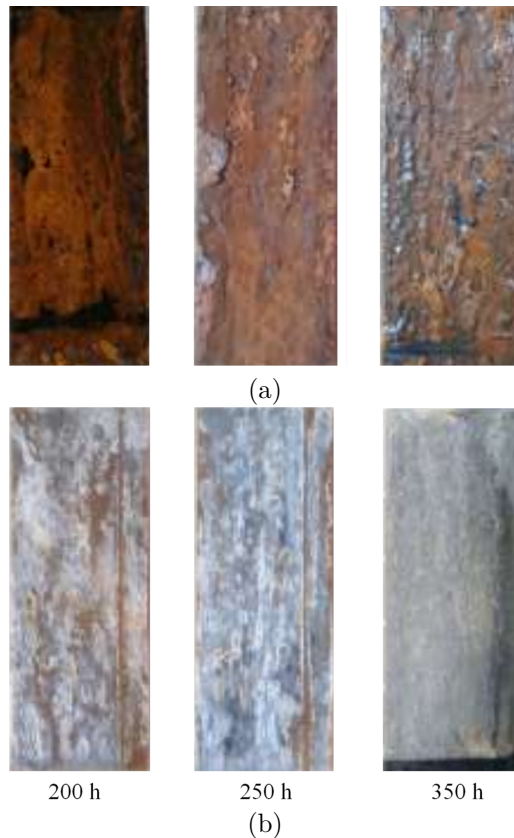


Figura 4. Probetas de material base expuestas a la CNS
a) ASTM A-500, b) acero galvanizado

Los patrones de la norma ASTM D-610 se utilizaron como referencia para realizar una evaluación del porcentaje de superficie corroída. Además, esta evaluación visual se complementó indicando la frecuencia y tamaño de ampollas presentes en las probetas según la norma D-714. En la Figura 5a se muestran las probetas de A-500 con limpieza superficial SSPC-SP-3 recubiertas, donde se han señalado manchas de corrosión en un 3 %, teniendo un 5 S luego de 200 h. Para la probeta expuesta por 250 h, se ha considerado una corrosión de 5 G y se ha evaluado como 3 G a la probeta que estuvo en la CNS por 250 h. La frecuencia de las ampollas fue medida para las probetas con tiempo de exposición de 200 y 350 h, indicando una evaluación de 6 M y 2 M, respectivamente. Mientras que en la probeta de 250 h de exposición esta frecuencia fue mayor, asignándole un valor de 6 MD con ampollas visibles.

Las probetas de ASTM A-500, con previa limpieza superficial SSPC-SP-5 a la aplicación del cromato de zinc, se indican en la Figura 5b, luego de tiempos de exposición de 200, 250 y 350 h, respectivamente. Para la probeta que estuvo expuesta por 200 h, se ha asignado una corrosión de 4 G, mientras que las probetas con tiempo de exposición de 250 y 350 h, fueron evaluadas como 5 G. En ninguna de estas probetas se pudo evidenciar la existencia de ampollas, teniendo una buena adherencia del recubrimiento.

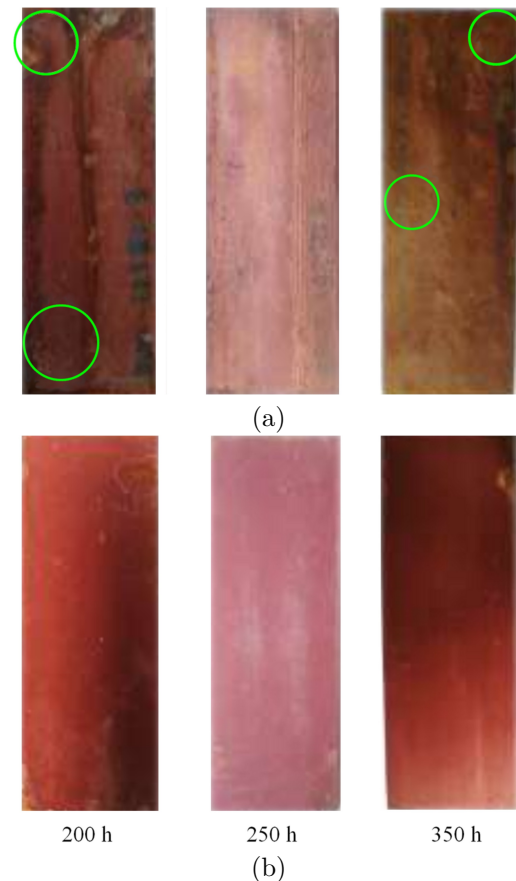


Figura 5. Probetas de ASTM A-500 expuestas a 200, 250 y 350 h, a) SSPC-SP-3, b) SSPC-SP-5

La Figura 6a presenta las probetas de acero galvanizado limpiadas con el método SSPC-SP-3 y recubiertas con cromato de zinc. En la probeta que estuvo en la CNS por 200 h, se han evidenciado manchas de corrosión, teniendo 5 S y no se registraron ampollas sobre su superficie. Para la probeta expuesta por 250 h, la corrosión visible es general, teniendo 6 G y se visualizaron pequeñas ampollas, por lo que se le ha asignado 6 M. A la probeta con tiempo de exposición de 350 h, se le ha asignado una corrosión de 4 S por manchas visibles y la frecuencia de ampollas fue poca, aunque considerables, por lo que se tiene 6 F. Las probetas de acero galvanizado con limpieza SSPC-SP-5 se muestran en la Figura 6b.

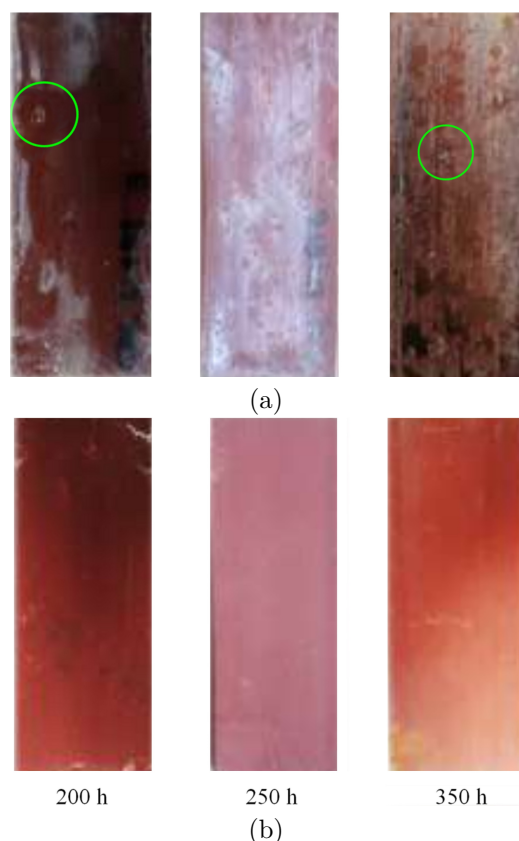


Figura 6. Probetas de ASTM A-500 galvanizado expuestas a 200, 250 y 350 h, a) SSPC-SP-3, b) SSPC-SP-5

En la probeta de acero galvanizado con tiempo de exposición de 250 h no se ha podido visualizar señales de corrosión y existen pequeñas ampollas, teniendo una frecuencia de 8 M. Mientras que las probetas expuestas por 200 y 350 h, muestran pequeñas manchas de corrosión, por lo que se les ha asignado 5 S y ninguna de ellas ha presentado ampollas sobre sus superficies.

4. Conclusiones

Los valores obtenidos de velocidad de corrosión de las probetas indican que la corrosión afecta más durante las primeras horas de exposición. Para el acero A-500 luego 200 y 350 h de exposición, se tuvo una velocidad de corrosión de 1,672 y 1,594 mm/año, respectivamente. Para el acero galvanizado sin recubrimiento, en los mismos tiempos se tuvo valores de 0,535 y 0,142 mm/año. Esta tendencia se mantuvo durante los ensayos de las probetas limpiadas mediante SSPC-SP3 y SSPC-SP5 de los dos materiales.

El acero A-500 sin tratamiento tuvo una máxima velocidad de corrosión de 2,092 mm/año, en la probeta expuesta por 250 h a la CNS, siendo 3,9 veces el valor más alto que el alcanzado por el acero galvanizado. Con el método SSPC-SP-3, el acero A-500 y el acero galvanizado alcanzaron un máximo de 0,139 y 0,103 mm/año, teniendo una diferencia del 25,9 %. Con

la limpieza según la norma SSPC-SP-5, la velocidad de corrosión más alta fue de 0,051 y 0,036 mm/año para el A-500 y el acero galvanizado, respectivamente. Entonces, en los aceros sin recubrimiento es evidente que el galvanizado es una protección anticorrosiva, aunque continúa presentando valores más elevados que con recubrimiento. La corrosión puede considerarse similar en los dos materiales, pero el método SSPC-SP-5 brinda menor corrosión en las probetas.

Al considerar el análisis entre los dos métodos de limpieza superficial, según la norma ASTM D-610, se tuvo que, el A-500 y el acero galvanizado limpiados con el método SSPC-SP-3 presentaron una corrosión superficial general y manchado entre 5 S y 5 G a 6 G. Mientras que esta evaluación se redujo en las probetas tratadas con la limpieza SSPC-SP-5, considerando a las probetas con una corrosión general 4 G.

La norma ASTM D-714 se utilizó para complementar la evaluación visual y determinar la frecuencia y tamaño de las ampollas. En las probetas limpiadas según la norma SSPC-SP-3 de A-500 y acero galvanizado, se llegó a tener una evaluación máxima y mínima de 2 M, 6 MD y 6 M, 6 S, respectivamente. Por este motivo se puede afirmar que, el recubrimiento de cromato de zinc se adhiere de manera similar en los dos materiales y brinda una protección anticorrosiva 7,7 y 8,2 veces superior que el A-500 y el acero galvanizado sin recubrimiento, respectivamente.

Referencias

- [1] M. Morrison, "A ductile fuse for special concentrically braced frames," in *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS2018)At: Hong Kong*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xJJqcW>
- [2] K. B. Yu., G. Stradanchenko S., S. A. Yu., S. Garmider A., and B. Kalmykova Yu., "Effect of the bus bodywork on impact strength properties in roll-over," *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, pp. 10 205–10 208, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3vsZf5F>
- [3] C. Cui, A. T. O. Lim, and J. Huang, "A cautionary note on graphene anti-corrosion coatings," *Nature Nanotechnology*, vol. 12, no. 9, pp. 834–835, Sep. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.187>
- [4] K. K. Toledo, H.-S. Kim, Y.-S. Jeong, and I.-T. Kim, "Residual compressive strength of short tubular steel columns with artificially fabricated local corrosion damage," *Materials*, vol. 13, no. 4, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma13040813>

- [5] V. N. Tseluikin and A. A. Koreshkova, "Corrosion resistance of composite coatings based on zinc," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 52, no. 7, pp. 560–562, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10556-016-0232-3>
- [6] Q. Li, H. Lu, J. Cui, M. An, and D. Li, "Electrodeposition of nanocrystalline zinc on steel for enhanced resistance to corrosive wear," *Surface and Coatings Technology*, vol. 304, pp. 567–573, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.056>
- [7] H. Kania, M. Saternus, J. Kudláček, and J. Svoboda, "Microstructure characterization and corrosion resistance of zinc coating obtained in a zn-alnibi galvanizing bath," *Coatings*, vol. 10, no. 8, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/coatings10080758>
- [8] R. Vera, E. Cruz, M. Bagnara, R. Araya, R. Henríquez, A. Díaz-Gómez, and P. Rojas, "Evaluation of anticorrosive coatings on carbon steel in marine environments: Accelerated corrosion test and field exposure," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 13, pp. 898–914, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20964/2018.01.66>
- [9] I. Stojanović, A. Farkas, V. Alar, and N. Degiuli, "Evaluation of the corrosion protection of two underwater coating systems in a simulated marine environment," *Advances in Surface Engineering*, vol. 71, no. 12, pp. 4330–4338, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03669-4>
- [10] K. Goyal, H. Singh, and R. Bhatia, "Hot-corrosion behavior of Cr₂O₃-CNT-coated ASTM-SA213-T22 steel in a molten salt environment at 700^{circ}C," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 26, no. 3, pp. 337–344, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1742-8>
- [11] SSPC, "Sspc-sp-3, surface preparation specification: Power tool cleaning," The Society for Protective Coatings, Tech. Rep., 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/3u4JX6Z>
- [12] —, "Sspc-sp-5, white metal blast cleaning," The Society for Protective Coatings, Tech. Rep., 1999. [Online]. Available: <https://bit.ly/3e3L2q1>
- [13] ASTM, "Astm b117 - 19 standard practice for operating salt spray (fog) apparatus," ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/B0117-19>
- [14] —, "Astm g1 - 03(2017)e1 standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/G0001-03R17E01>
- [15] —, "Astm d610 - 08(2019) standard practice for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces," ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/D0610-08R19>
- [16] —, "Astm d714 - 02(2017) standard test method for evaluating degree of blistering of paints," ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/D0714-02R17>



TRANSFER LEARNING EN LA CLASIFICACIÓN BINARIA DE IMÁGENES TÉRMICAS

TRANSFER LEARNING FOR BINARY CLASSIFICATION OF THERMAL IMAGES

Daniel Pérez-Aguilar^{1,*} , Redy Risco-Ramos^{1,*} , Luis Casaverde-Pacherrez¹

Recibido: 13-11-2020, Recibido tras revisión: 17-12-2020, Aceptado: 22-02-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

La clasificación de imágenes térmicas es un aspecto clave en el sector industrial, debido a que suele ser el punto de partida en la detección de fallos en equipos eléctricos. En algunos casos, esta tarea se automatiza mediante el uso de técnicas tradicionales de inteligencia artificial, mientras que en otros, es realizada de manera manual, lo cual puede traer consigo altas tasas de error humano. Este artículo presenta un análisis comparativo entre once arquitecturas de *transfer learning* (AlexNet, VGG16, VGG19, ResNet, DenseNet, MobileNet v2, GoogLeNet, ResNeXt, Wide ResNet, MNASNet y ShuffleNet) mediante el uso de *fine-tuning*, con la finalidad de realizar una clasificación binaria de imágenes térmicas en una red de distribución eléctrica. Para ello, se dispone de una base de datos con 815 imágenes, divididas mediante la técnica tipo hold-out 60-20-20 y validación cruzada con 5-folds, para finalmente analizar su rendimiento mediante el test de Friedman. Luego de los experimentos, se obtuvieron resultados satisfactorios con exactitudes superiores a 85 % en diez de las arquitecturas previamente entrenadas. Sin embargo, la arquitectura que no se entrenó previamente presentó una exactitud baja; concluyéndose que la aplicación de *transfer learning* mediante el uso de arquitecturas previamente entrenadas es un mecanismo adecuado en la clasificación de este tipo de imágenes, y representa una alternativa confiable frente a técnicas tradicionales de inteligencia artificial.

Palabras clave: imágenes térmicas, *fine-tuning*, preentrenamiento, test de Friedman, *transfer learning*

Abstract

The classification of thermal images is a key aspect in the industrial sector, since it is usually the starting point for the detection of faults in electrical equipment. In some cases, this task is automated through the use of traditional artificial intelligence techniques, while in others, it is performed manually, which can lead to high rates of human error. This paper presents a comparative analysis between eleven transfer learning architectures (AlexNet, VGG16, VGG19, ResNet, DenseNet, MobileNet v2, GoogLeNet, ResNeXt, Wide ResNet, MNASNet and ShuffleNet) through the use of fine-tuning, in order to perform a binary classification of thermal images in an electrical distribution network. For this, a database with 815 images is available, divided using the 60-20-20 hold-out technique and cross-validation with 5-Folds, to finally analyze their performance using Friedman test. After the experiments, satisfactory results were obtained with accuracies above 85 % in 10 of the previously trained architectures. However, the architecture that was not previously trained had low accuracy; with this, it is concluded that the application of transfer learning through the use of previously trained architectures is a proper mechanism in the classification of this type of images, and represents a reliable alternative to traditional artificial intelligence techniques.

Keywords: fine-tuning, Friedman test, pre-training, thermal images, transfer learning

^{1,*}Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control, Universidad de Piura, Perú.
 Autor para correspondencia: ✉: daniel.perez.a@alum.udpe.edu.pe

Forma sugerida de citación: Pérez-Aguilar, D.; Risco-Ramos, R. y Casaverde-Pacherrez, L. (2021). «Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 71-86. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.07>.

1. Introducción

Actualmente la inteligencia artificial (IA) es una disciplina en auge que ha redefinido muchos de los procesos que se realizan en la industria, presentando aplicaciones muy diversas, las cuales abarcan el reconocimiento de objetos mediante visión artificial, reconocimiento y síntesis de voz, comprensión lectora, sistemas de traducción, comprensión del lenguaje, etc. [1]. La IA no es un término nuevo, pues existe desde hace muchos años; sin embargo, lo que ha cambiado en las últimas épocas es la potencia computacional, con la cual se pueden computar modelos mucho más complejos en un menor tiempo [2]. Se la define como un conjunto de algoritmos cuyo propósito es crear máquinas que emulen las capacidades de los seres humanos. Visto de otra manera, es un software que puede ser entrenado para reconocer patrones y realizar predicciones, en algunos casos de manera más precisa que los seres humanos [3]. Dentro de la IA, encontramos términos como el *machine learning* (ML) y el *deep learning* (DL) [4].

machine learning (ML) o aprendizaje automático, es una rama de la IA que busca generalizar comportamientos de un conjunto de datos de entrada, es decir, que su objetivo es predecir comportamientos futuros basados en encontrar patrones dentro de grandes conjuntos de datos [5]. A su vez, el DL o aprendizaje profundo, forma parte del *machine learning* [6], cuyo objetivo es que los sistemas imiten el comportamiento y el razonamiento de las personas automáticamente; en otras palabras, que el ser humano esté involucrado lo menos posible en el proceso. Este objetivo se basa en el uso de redes neuronales artificiales (ANN), las cuales simulan la sinapsis del cerebro humano [7]. En la Figura 1 se puede apreciar la estructura tradicional de una red neuronal artificial, en la que se incluyen la capa de entrada, capas ocultas y la capa de salida.

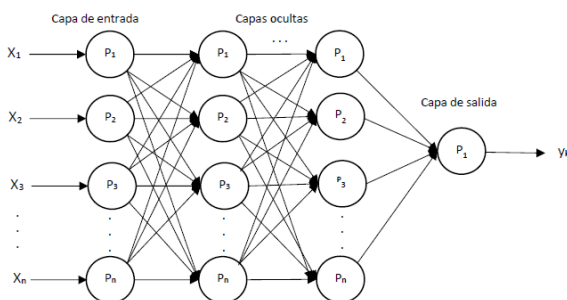


Figura 1. Estructura de una red neuronal artificial [8]

Además, se debe señalar que dentro de las ANN encontramos a las redes neuronales convolucionales (CNN), que son un tipo avanzado y de alto potencial del modelo clásico de red neuronal artificial, diseñadas para abordar problemas de mayor complejidad, y usadas generalmente en la clasificación de imágenes [9].

En relación con la separación del set de datos, la técnica tipo *hold-out* [10] es una de las más utilizadas, y consiste en realizar una división de los datos en tres subconjuntos: el 60 % destinado a entrenamiento, el 20 % a validación y el 20 % restante a las pruebas del modelo, tal como se observa en la Figura 2. Sin embargo, este tipo de técnicas no puede considerarse suficiente para evaluar el rendimiento de los modelos, por lo que la bibliografía sugiere aplicar una validación cruzada con *k-folds* [11] a través de la división del set de datos aleatoriamente en *k* subconjuntos, de los cuales *k* - 1 se utilizan para entrenar el modelo, y uno para validarlo. Este mecanismo se debe repetir *k* veces en cada iteración, empleando distintos subconjuntos de validación, tal como se aprecia en la Figura 3. Finalmente, se recomienda realizar una comparación estadística de los resultados de cada modelo [12], en donde entran a tallar técnicas paramétricas como el análisis ANOVA, o no paramétricas como el test de Friedman [13].

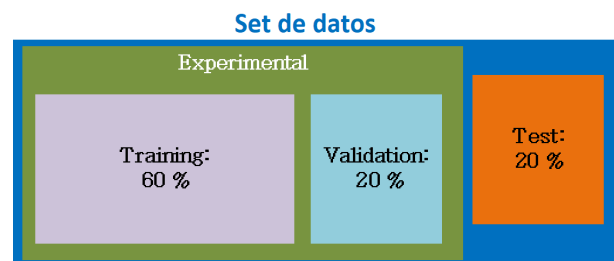


Figura 2. Separación tipo hold-out

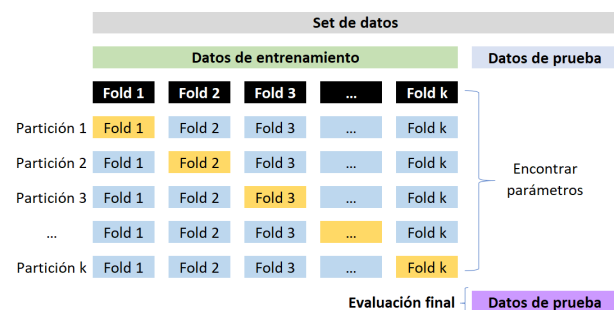


Figura 3. Validación cruzada con k-folds

Algunas investigaciones muestran que la aplicación de inteligencia artificial es útil en el sector eléctrico a través de la utilización de imágenes térmicas para automatizar la clasificación de las mismas [14]. Este tipo de imágenes son capturadas mediante el uso de cámaras infrarrojas, por lo que entra a tallar otro término relevante: la termografía, una técnica que permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, cuya ventaja principal es la no necesidad de tener contacto físico con el objeto o pieza a estudiar, con lo que, el operar de la maquinaria no se detiene [15].

La Figura 4 muestra un ejemplo de una imagen térmica de un equipo de alta tensión capturada desde tierra.

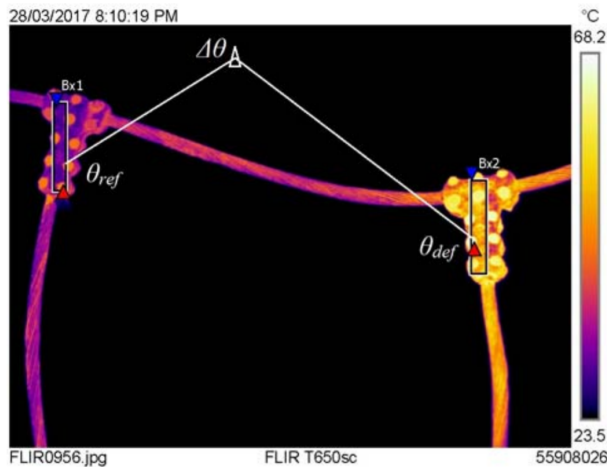


Figura 4. Imagen térmica de un equipo de alta tensión [15]

A continuación, se exponen las investigaciones más relevantes del uso de técnicas tradicionales de inteligencia artificial en la clasificación de imágenes térmicas. Un claro ejemplo es la propuesta de un sistema de reconocimiento automático para la clasificación de imágenes termográficas de una red de distribución de energía eléctrica [16], en donde se implementó una CNN y el algoritmo JSEG o segmentación J, el cual consiste en una reducción del número de colores y la fusión de los mismos basado en la similitud de las regiones de las imágenes [17]. Al igual que una investigación realizada en el Departamento de Tecnología de Chongqing, China [18], donde se aborda la visión por computadora mediante el uso de imágenes térmicas infrarrojas capturadas sin perturbar el funcionamiento de las subestaciones eléctricas. Para ello entrenaron un perceptrón multicapa o *multilayer perceptron* (MLP), el cual es un tipo de red neuronal artificial formado por diversas capas de neuronas intermedias u ocultas, utilizado para solucionar problemas que no se pueden separar linealmente [19].

En [20] se propone un enfoque semiautomático para evaluar la condición térmica de las instalaciones eléctricas de un edificio mediante el análisis de imágenes infrarrojas, utilizando un perceptrón multicapa (MLP) y el análisis de componentes principales (PCA); este último es una técnica estadística que tiene como finalidad simplificar la complejidad de la muestra mediante la selección o extracción de las características más representativas de los datos de entrada [21]; mientras que en [22], se expone un método de diagnóstico inteligente para clasificar diferentes condiciones de equipos eléctricos utilizando datos obtenidos de imágenes infrarrojas mediante el uso del algoritmo K-means, el cual se encarga de agrupar las imágenes de los equipos eléctricos

a través del encuentro y clasificación de clústeres o grupos con características similares [23].

Las investigaciones mencionadas se centran en entrenar un modelo desde cero o de manera tradicional para un escenario específico; sin embargo, actualmente, existen técnicas que facilitan este proceso como el *transfer learning* (TF), el cual forma parte del *deep learning* y consiste en utilizar una red preentrenada, es decir, reusar la arquitectura y los pesos de un modelo entrenado con grandes volúmenes de datos de entrada y aplicarlos a escenarios distintos con otros set de datos, buscando realizar clasificaciones más rápidas y utilizando menor carga computacional [24]. Un ejemplo de las bases de datos utilizadas para entrenar estos modelos es el caso de ImageNet, la cual contiene más de catorce millones de imágenes [25].

Uno de los paradigmas del *transfer learning* es el *fine-tuning* del modelo, el cual busca adaptarlo a un nuevo dominio de aplicación [26]; para ello se toma el modelo previamente entrenado y se varían algunos parámetros como la tasa de aprendizaje, teniendo como objetivo lograr mejoras significativas en las predicciones [27].

La revisión bibliográfica revela que existen diversas aplicaciones de *transfer learning* en sectores como (i) salud, mediante la clasificación de patologías en imágenes neurológicas [28], detección de objetos como pistolas o armas blancas en imágenes de rayos X [29] o cervicales [30], entre otros. (ii) En la agroindustria, como se observa en [31], donde se presenta una comparación de las arquitecturas de *transfer learning* ResNet, GoogLeNet, VGG16, AlexNet y DenseNet, con la finalidad de clasificar un conjunto de datos que contiene imágenes de flores, demostrando que la arquitectura VGG16 previamente entrenada obtiene niveles de exactitud superiores a las demás. (iii) O en el sector alimenticio, como se expone en [32], donde se indica que las CNN son las técnicas de clasificación de imágenes más utilizadas, por lo que centran su investigación en la clasificación de alimentos con la finalidad de obtener un estilo de vida más saludable; para ello utilizan una base de datos de 500 imágenes, además de las arquitecturas previamente entrenadas VGG16, VGG19, ResNet e InceptionV3, siendo esta última la que obtuvo mejores resultados.

Sin embargo, al estudiar la aplicación de imágenes térmicas y técnicas de *transfer learning* en el sector eléctrico, nos encontramos con una escasez de las mismas. Siendo algunas de las más representativas el caso de [33], donde se propone un mecanismo de clasificación de imágenes térmicas de los sistemas de rodamientos de rotores; para ello modifican una red neuronal convolucional con el uso de *transfer learning*, no obstante, no especifica la arquitectura de TF utilizada. O como se detalla en [34], en donde se busca automatizar la supervisión del estado de la maquinaria industrial mediante el uso de imágenes térmicas y una CNN, indicando

que una desventaja de esta última es la necesidad de contar con grandes volúmenes de datos para su entrenamiento, por lo que proponen el uso de la arquitectura VGG16 como método de reutilización de capas de la red neuronal.

Lo señalado en párrafos anteriores evidencia que las ventajas del uso de *transfer learning* no se están explotando en su totalidad en el sector eléctrico, ya que no existe un estudio que aplique diversas arquitecturas con el mismo set de datos, por lo que el objetivo del presente estudio es proponer una alternativa al uso tradicional de técnicas de inteligencia artificial mediante el análisis de once arquitecturas de *transfer learning* y el paradigma de auto-tuning, aplicadas a la clasificación binaria de imágenes térmicas en una red de distribución eléctrica.

2. Materiales y métodos

La Figura 5 representa la metodología seguida en la realización de la investigación, la cual parte de la recolección de datos de campo mediante la captura de imágenes térmicas; posteriormente se realiza el diseño de una arquitectura base en la que se incluyen distintas arquitecturas de *transfer learning* entrenadas previamente, cada una de ellas es entrenada y probada para finalmente comparar los resultados obtenidos. Todo este proceso se realizó con la ayuda del servicio en línea Google Colaboratory, a través del uso de Jupyter Notebooks [35].

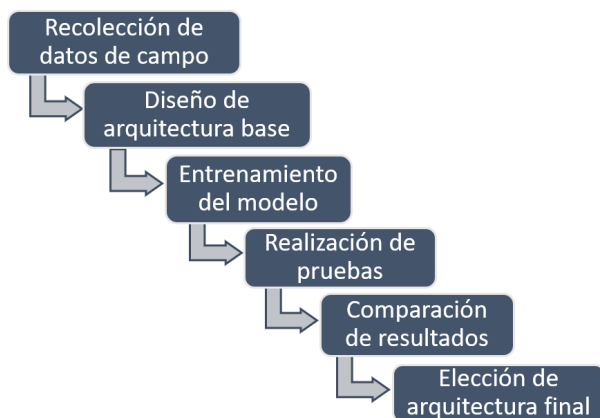


Figura 5. Metodología

2.1. Base de datos

La base de datos utilizada en este trabajo corresponde a 815 imágenes térmicas, pertenecientes a una empresa de distribución eléctrica peruana, clasificadas en dos categorías, subestaciones eléctricas y líneas de transmisión. Este conjunto de datos es superior en tamaño al utilizado en [18], [20], [22], [36] y [37]. Las imágenes

fueron capturadas mediante la cámara infrarroja TP8S, cuyas especificaciones se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la cámara TP8S [38]

Característica	Descripción
Tipo de detector	FPA (384 × 288 píxeles, 35 m)
Rango espectral	8-14 m
Sensibilidad térmica	0.08 °C a 130 °C
Campo de visión	22° × 16° / 35 mm
Enfoque electrónico	Automático o motorizado
Zoom	Zoom continuo de ×1 a ×10

El procedimiento que la empresa de distribución eléctrica ha venido ejecutando incluye cinco fases que se detallan a continuación y se grafican en la Figura 6. (i) En primer lugar, se contrata a una empresa externa para la captura de imágenes térmicas, específicamente líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, esto se realiza de forma semanal o mensual. (ii) La empresa de servicios entrega todas las imágenes a un especialista certificado en análisis de imágenes térmicas. (iii) El especialista debe clasificar manualmente las imágenes y dividirlas entre líneas de transmisión o equipos de subestaciones eléctricas, ya que requieren diferentes tipos de análisis. (iv) Luego el especialista procede al análisis de cada imagen y determina, de acuerdo con su conocimiento y experiencia, si en cada una hay evidencia de fallos presentada por la detección de algún punto caliente. (v) Finalmente, si el especialista detecta un punto caliente, prepara el informe respectivo y luego toma las medidas correctivas apropiadas.

El presente estudio se centró en automatizar la fase 3 del proceso mediante el uso de técnicas de *transfer learning*.

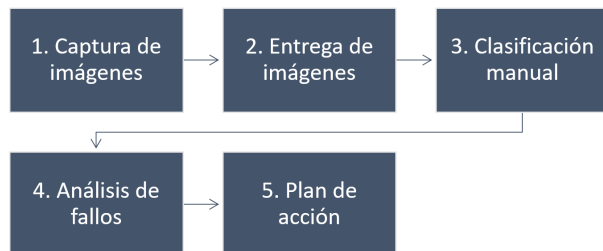


Figura 6. Proceso de clasificación de imágenes térmicas

Las imágenes presentan una resolución de 384 × 288 píxeles. En la Figura 7 se aprecian algunos ejemplos de las imágenes típicas de equipos de líneas de transmisión, y en Figura 8 de subestaciones eléctricas las cuales representan las dos clases del modelo.



Figura 7. Imagen típica de equipos de líneas de transmisión

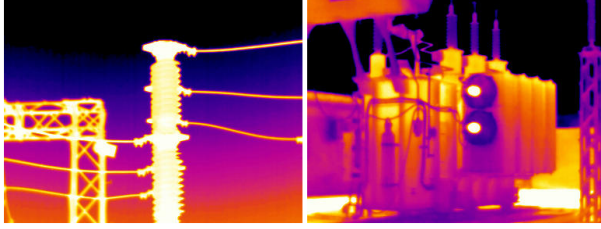


Figura 8. Imagen típica de equipos de subestaciones eléctricas

2.2. Set de datos

Para la realización de los experimentos se utilizaron 815 imágenes térmicas, divididas en tres conjuntos de datos con una división 60-20-20, conocido como una separación tipo *hold-out* (ver Figura 2). El 60 % de las imágenes se consideraron como datos de entrenamiento y el 20 % de validación, mientras que el 20 % restante, se incluye en los datos de prueba del modelo (ver Tabla 2), es decir, que este es entrenado y validado paralelamente para finalmente ser probado con imágenes nuevas que no han sido consideradas con anterioridad. En [39] se indica que los modelos que generalizan adecuadamente muestran métricas de exactitud y pérdida similares en el entrenamiento y validación, evitándose el sobreajuste.

Tabla 2. Distribución de conjuntos de datos

Clase	Entrenamiento	Validación	Prueba
Línea	206	68	68
Subestación	283	95	95
TOTAL	489	163	163

2.3. Arquitecturas

En el estudio se consideraron once arquitecturas de modelos previamente entrenados mediante el uso del paquete TorchVision, el cual forma parte de PyTorch, que es una biblioteca de aprendizaje automático y de código abierto; ya que como se indica en [40], los modelos en PyTorch son más rápidos y fáciles de implementar y entrenar. Las arquitecturas utilizadas fueron:

2.3.1. AlexNet

Red neuronal convolucional compuesta por ocho capas [41], cinco de las cuales son *max-pooling*, y las tres restantes, *fully connected*. Esta arquitectura fue entrenada con la función de activación ReLU (*Rectified Linear Units*) y la base de datos ImageNet. Como se observa en la Figura 9, la entrada de la red son las imágenes de 224×224 píxeles, las cuales se van transformando en cada una de las capas, hasta obtener como salida, la clasificación de mil categorías.

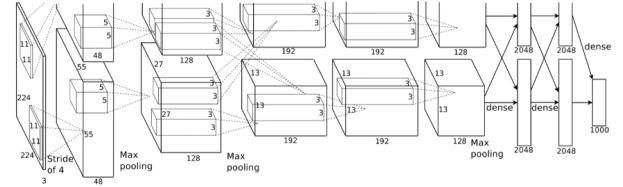


Figura 9. Arquitectura AlexNet [41]

2.3.2. VGG16

Red compuesta por 16 capas y que también fue entrenada con la base de datos ImageNet [42], suponiendo mejoras en relación con la arquitectura AlexNet puesto que reemplaza los grandes filtros de los kernels por un conjunto de filtros de tamaño 3×3 . La arquitectura de VGG16 se aprecia en la Figura 10.

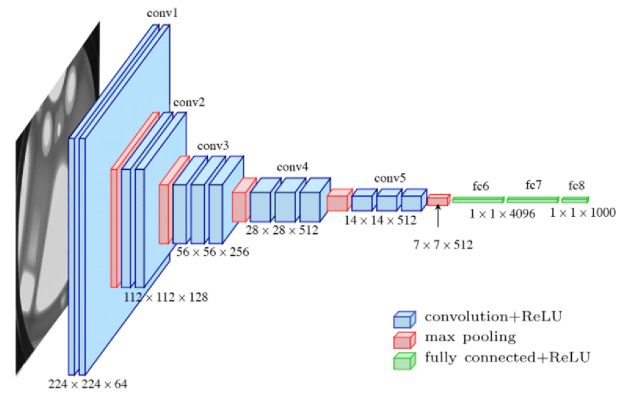


Figura 10. Arquitectura VGG16 [42]

2.3.3. VGG19

Red neuronal convolucional compuesta por 16 capas convolucionales [43], tres fully-connected, cinco Max-Pool y una SoftMax, con un aproximado de 143 millones de parámetros. La arquitectura de VGG19 se aprecia en la Figura 11.

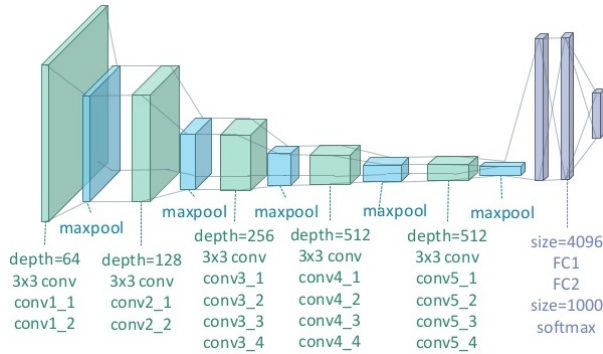


Figura 11. Arquitectura VGG19 [43]

2.3.4. ResNet

Arquitectura que busca que el incremento de capas se realice de manera distinta a la tradicional [44], por lo que agrega una conexión residual con una capa identidad, la cual pasa a la siguiente capa de manera directa mejorando considerablemente el entrenamiento del modelo. Un bloque tradicional de la arquitectura ResNet se observa en la Figura 12.

2.3.5. DenseNet

CNN en la que cada capa obtiene entradas adicionales de todas las capas anteriores y pasa sus propios mapas de características a todas las capas posteriores [45], es decir, que se concatenan cada una de las salidas de las capas anteriores con las posteriores, buscando contar con menor cantidad de parámetros y una mayor exactitud que redes como ResNet. La arquitectura de DenseNet se aprecia en la Figura 13.

2.3.6. GoogLeNet

Red neuronal desarrollada por Google con la finalidad de realizar clasificaciones de imágenes [46]. Esta CNN está basada en la arquitectura Inception [47], por lo que usa módulos que dan la posibilidad de elegir entre distintos tamaños de filtro convolucional en cada uno de los bloques. Un ejemplo del módulo inception se aprecia en la Figura 14.

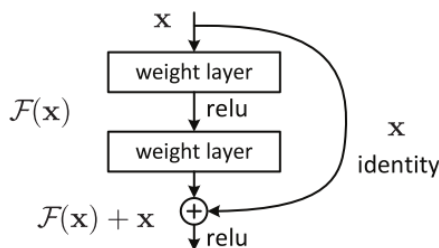


Figura 12. Bloque de la arquitectura ResNet [44]

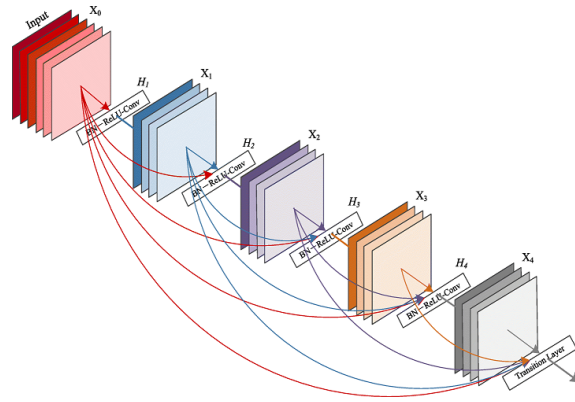


Figura 13. Bloque de la arquitectura DenseNet [45]

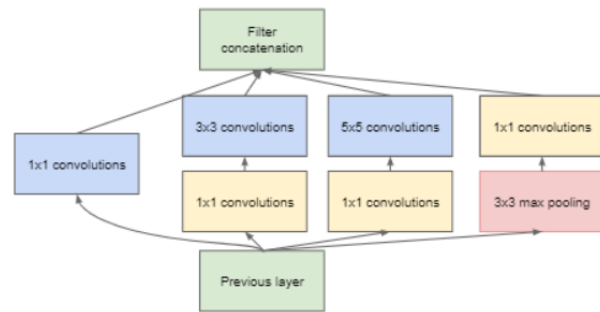


Figura 14. Módulo inception con reducciones de dimensión [48]

2.3.7. MobileNet v2

Se basa en el uso de convoluciones separables en profundidad y utiliza una estructura residual invertida [49], donde la entrada y salida del bloque residual son capas delgadas de cuello de botella opuestas a los modelos residuales tradicionales que utilizan representaciones expandidas en la entrada, tal como se detalla en la Figura 15.

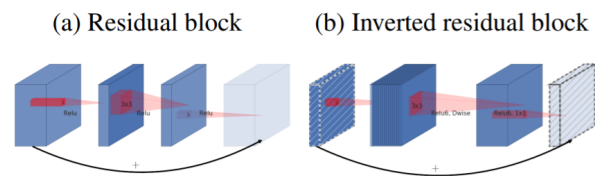


Figura 15. Bloques de la arquitectura MobileNet v2 [49]

2.3.8. ResNeXt

Es una variante de ResNet que busca aumentar el número de caminos o rutas paralelas a la conexión residual [50], es decir, que ResNeXt es una CNN con múltiples ramas, tal como se observa en la Figura 16, la cual muestra un bloque con una cardinalidad de 32.

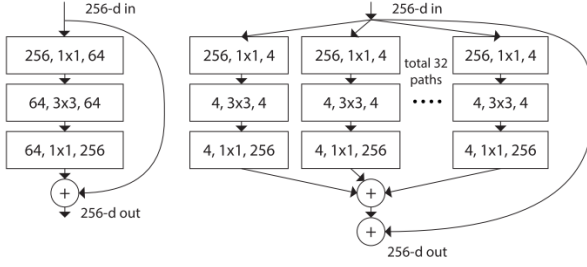


Figura 16. Bloque de la arquitectura ResNeXt [50]

2.3.9. Wide ResNet

Es una red neuronal que presenta una variación a la arquitectura ResNet tradicional [51], disminuyendo la profundidad del modelo y aumentando el ancho de las redes residuales. Los bloques característicos dentro de esta CNN son: basic, bottleneck, basic-wide y wide-dropout. La Figura 17 muestra el detalle de este último.

2.3.10. MNASNet

Es una red neuronal convolucional, que al igual que MobileNet [52], diseñada y optimizada para dispositivos móviles y busca que el modelo obtenga un equilibrio entre latencia y precisión. En la Figura 18 se aprecia un ejemplo del diseño de una capa convolucional con un kernel de 5×5 .

2.3.11. ShuffleNet

Es una CNN que presenta como componente principal una nueva operación de reorganización de canales [53], buscando que la información fluya con mayor facilidad en los mismos. En la Figura 19 se observa una unidad ShuffleNet, que es un elemento central dentro de esta arquitectura.

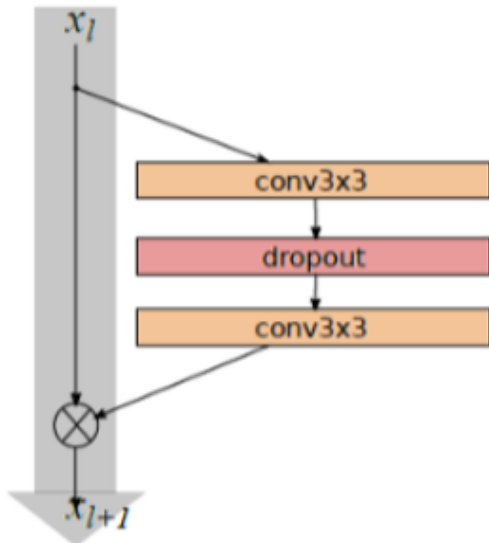


Figura 17. Bloque wide-dropout [51]

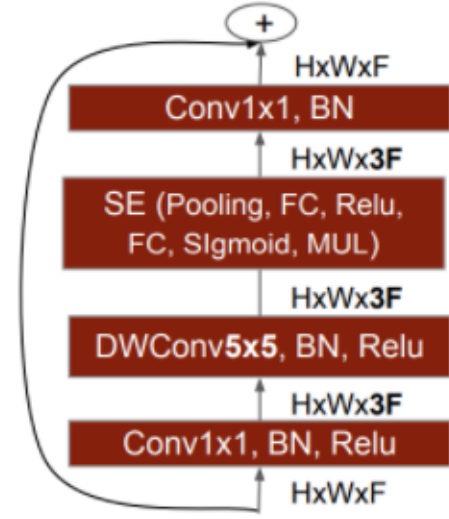


Figura 18. Capa convolucional de MNASNet [52]

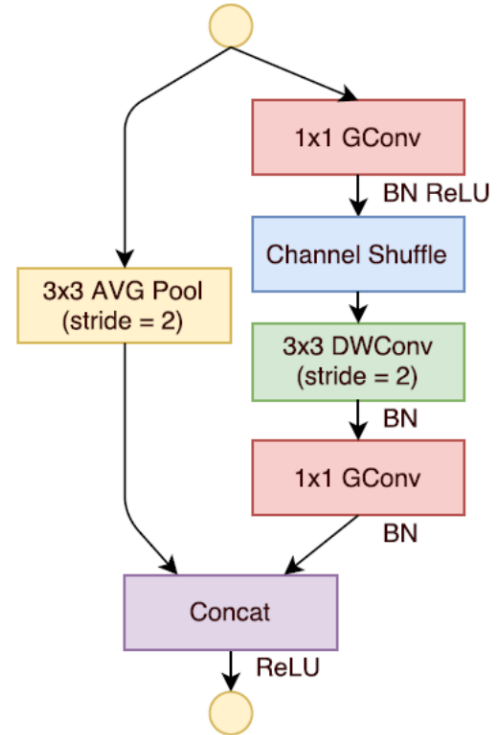


Figura 19. Unidad ShuffleNet [53]

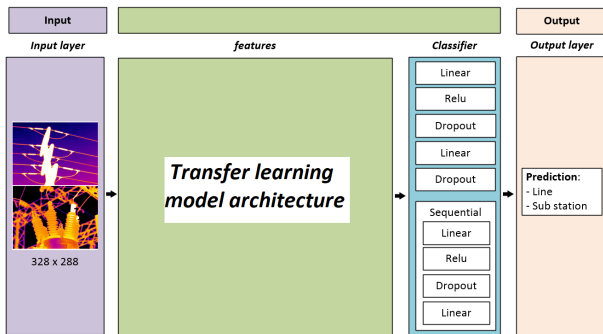
Finalmente, se elaboró la Tabla 3 mediante información proporcionada en el sitio web de torchvision [54]; en ella se resumen las características de estas arquitecturas en relación con el peso en megabytes y número de parámetros que utilizan para el entrenamiento del modelo, resaltando que ShuffleNet es la única arquitectura que actualmente no permite el uso del parámetro de configuración de preentrenamiento, es decir, que su peso es cero megabytes.

Tabla 3. Características de las arquitecturas utilizadas

Nº	Arquitectura	Peso (mb)	Parámetros (millones)
1	AlexNet	233	61.1
2	VGG16	528	138.36
3	VGG19	548	143.67
4	ResNet	230	60.19
5	DenseNet	77.4	20.01
6	GoogLeNet	49.7	13
7	MobileNet v2	13.6	3.5
8	ResNeXt	340	44.55
9	Wide ResNetx	243	126.89
10	MNASNet	16.9	4.38
11	ShuffleNet	0*	7.39

2.4. Modelo

La Figura 20 muestra el diseño de la arquitectura base a utilizar. La primera sección corresponde a la capa de entrada, en la cual se incluyeron las imágenes de 328×288 píxeles. Posteriormente en el apartado denominado «Transfer learning model architecture» se agregaron las once arquitecturas, resaltando que la capa de clasificación de cada una de ellas fue editada para realizar una clasificación binaria ya que originalmente fueron diseñadas para clasificar aproximadamente mil imágenes. Finalmente, se tiene a la capa de salida que corresponde a las predicciones del modelo.

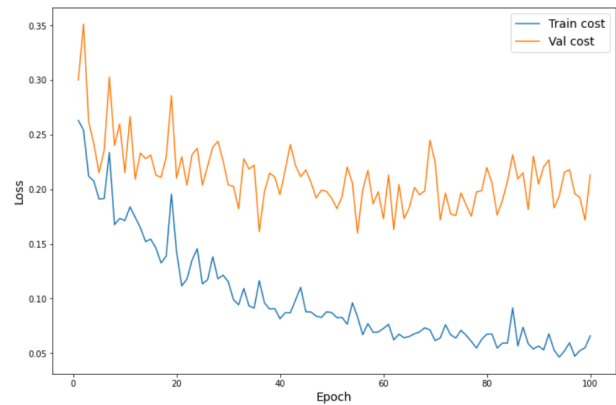
**Figura 20.** Arquitectura base

Debido a que no se encontró investigaciones que comparen este número de arquitecturas aplicadas a la termografía, y con la finalidad de realizar una comparación justa entre los modelos, se consideraron los mismos hiperparámetros en todas las pruebas realizadas. La elección de estos fue tomada sobre la base de experimentos empíricos, tal como se propone en [55–57], teniendo como base los valores de la Tabla 4. Los resultados de los experimentos iniciales arrojaron que existe un punto de quiebre aproximadamente en la época número 20, en donde las curvas de entrenamiento y validación presentan una tendencia de separación,

evidenciándose problemas de *overfitting* o sobreentrenamiento (ver Figura 21). Se concluye que los modelos obtienen mejores resultados según los hiperparámetros detallados en la Tabla 5 y es con estos datos con los que se ejecutaron las demás pruebas.

Tabla 4. Experimentos empíricos de hiperparámetros

Hiperparámetro	Valor
Tasa de aprendizaje	10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5}
Imágenes por Batch	16, 32, 64 y 128
Número de épocas	5, 10, 20, 30, 50 y 100
Función de costo	Cross Entropy, Multi Margin Loss y MSE
Optimizador	Adagrad, Adam, Adamax, RMSprop y SGD

**Figura 21.** Experimento con 100 épocas**Tabla 5.** Configuración final de hiperparámetros

Hiperparámetro	Valor
Tasa de aprendizaje	0.0001
Imágenes por Batch	32
Número de épocas	20
Función de costo	Multi Margin Loss
Optimizador	Adam

Los modelos mejoraron sus prestaciones al normalizar los datos de entrada calculando la desviación estándar y media de los conjuntos de datos. Además, a pesar de que el set de datos (815 imágenes) es superior a otras investigaciones como [18], [20], [22], [36] y [37] en las que la máxima cantidad de imágenes utilizada es 500. La bibliografía sugiere como buena práctica la aplicación de técnicas que contribuyan a la mejora de la calidad del entrenamiento, por lo que se utilizó Data Augmentation [58, 59] mediante las transformaciones *random horizontal flip*, *random vertical flip* y *random rotation*. La Figura 22 muestra algunos resultados de las transformaciones utilizadas.

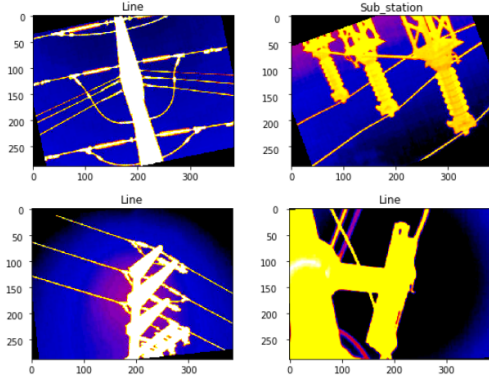


Figura 22. Imágenes con data augmentation

3. Resultados y discusión

Se realizó el entrenamiento de las once arquitecturas tomando los valores de la Tabla 5, obteniendo resultados de exactitud de cada uno de ellos, los cuales se muestran en la Tabla 6. Por otro lado, en la Tabla 7 se observan las tasas de pérdida de cada una de las arquitecturas. En función de estos resultados se aprecia que DenseNet obtiene un mayor grado de exactitud, mientras que VGG16 presenta una tasa de pérdida más baja. Un dato adicional a considerar es que ShuffleNet alcanza los peores resultados debido a que fue la única arquitectura sin entrenamiento previo, evidenciando que las arquitecturas previamente entrenadas, obtienen mejores resultados.

Tabla 6. Exactitud de las arquitecturas

Arquitectura	Entrenamiento	Validación	Prueba
DenseNet	96.52	92.02	98.15
VGG19	93.66	90.18	96.31
Wide ResNetx	94.68	90.18	96.31
MobileNet v2	94.68	88.95	95.70
VGG16	95.91	91.41	95.09
ResNeXt	94.06	92.02	95.09
ResNet	93.66	84.66	94.47
AlexNet	95.50	91.41	93.86
GoogLeNet	95.09	88.95	93.86
MNASNet	71.41	69.93	79.14
ShuffleNet	62.78	68.09	76.68

Tabla 7. Tasa de pérdida de las arquitecturas

Arquitectura	Entrenamiento	Validación	Prueba
VGG16	0.130571	0.195825	0.106733
VGG19	0.175259	0.257767	0.124051
MobileNet v2	0.179914	0.283927	0.124497
DenseNet	0.134446	0.198757	0.126488
AlexNet	0.127838	0.226890	0.134585
GoogLeNet	0.205683	0.242438	0.164706
ResNet	0.220600	0.295843	0.175979
ResNeXt	0.215153	0.241967	0.179627
Wide ResNetx	0.246464	0.271462	0.19046
MNASNet	0.507049	0.529690	0.395779
ShuffleNet	0.647315	0.579723	0.524782

Investigaciones como [60], señalan que las métricas de exactitud y tasa de pérdida presentan un alto grado de subjetividad, por lo que se propone el uso de técnicas estadísticas para evaluar los resultados de las arquitecturas, específicamente F1-score, cuyo mecanismo de cálculo se observa en (1). Precision y Recall se obtienen de (2) y (3) respectivamente, donde TP representa a los verdaderos positivos, FP a los falsos positivos y FN a los falsos negativos. Los resultados se detallan en la Tabla 8, demostrando que la arquitectura VGG16 se ubica en primer lugar con el valor más alto de F1-score, el cual corresponde a 95.11 %.

$$F1_{score} = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Tabla 8. Comparación entre arquitecturas: F1-score

Arquitectura	Precision	Recall	F1-score
VGG16	96.12	94.12	95.11
ResNeXt	92.86	93.79	93.32
MobileNet v2	93.62	92.54	93.08
ResNet	92.36	93.48	92.92
VGG19	92.25	92.85	92.55
DenseNet	93.48	91.59	92.53
Wide ResNetx	93.13	91.8	92.46
AlexNet	93.03	89.91	91.44
GoogLeNet	92.11	89.39	90.73
MNASNet	85.71	86.11	85.91
ShuffleNet	29.14	50.00	36.82

El mecanismo de separación tipo *hold-out* puede no ser suficiente al comparar distintos modelos, es por ello por lo que con la finalidad de eliminar esta fuente de variabilidad se realizaron otros experimentos mediante validación cruzada con 5-folds (ver Figura 23) tal como se sugiere en [61], seguida de una comparación estadística de los resultados de cada modelo, de la misma forma como se realiza en [12]. Los resultados de la validación cruzada se pueden apreciar en la Tabla 9.

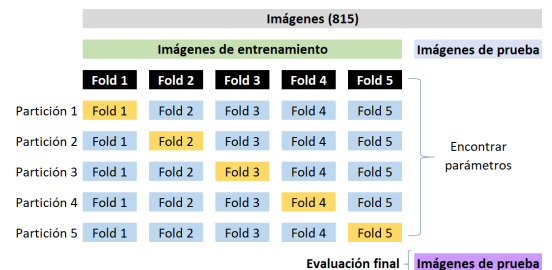


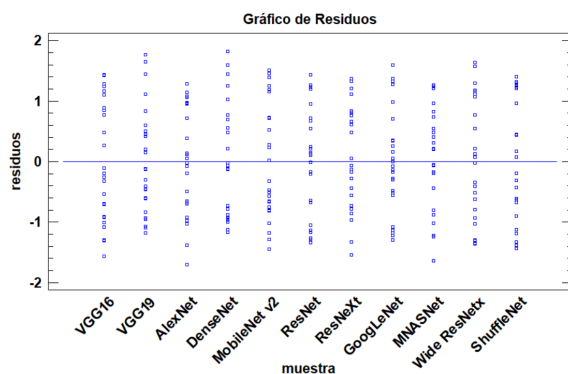
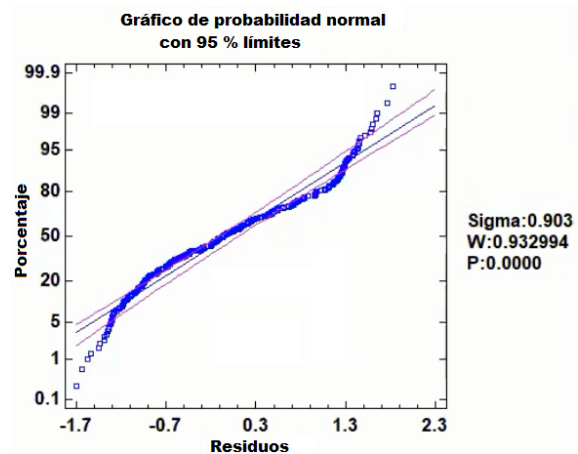
Figura 23. Validación cruzada con 5-folds

Tabla 9. Resultados – Validación cruzada con 5-folds

Arquitectura	Fold 1	...	Fold 5	Promedio
VGG16	93.87	...	98.16	96.81
VGG19	93.87	...	98.77	95.83
AlexNet	90.18	...	99.38	95.34
ResNeXt	94.48	...	98.16	94.6
DenseNet	88.34	...	98.16	94.36
MobileNet v2	90.18	...	96.32	93.99
ResNet	93.87	...	95.09	93.74
GoogLeNet	88.96	...	93.86	93.5
MNASNet	86.51	...	98.15	92.52
Wide ResNetx	84.66	...	94.48	89.82
ShuffleNet	68.09	...	72.39	70.06

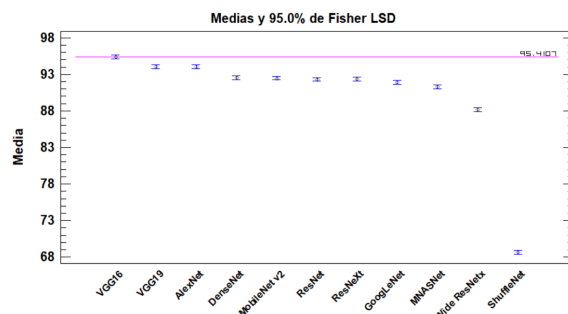
En relación con las pruebas estadísticas para evaluar el rendimiento de las arquitecturas, en primer lugar, se ejecutó 30 veces cada modelo, tal como se llevó a cabo en [12]. Posteriormente se realizó el análisis de residuos y de probabilidad normal evidenciándose que, según el primero, se podría aplicar una prueba paramétrica ya que los residuos presentan una dispersión similar (ver Figura 24). Sin embargo, al analizar el gráfico de probabilidad normal para verificar que los residuos se aproximen a una distribución normal, se aprecia que existen datos que se encuentran fuera del intervalo de confianza, con el coeficiente de Shapiro–Wilk igual a 0.932994 y un *p-value* igual a 0 (ver Figura 25). De igual manera, se realizó la transformación de los datos mediante la raíz cuadrada, sin embargo, estos siguen encontrándose fuera del intervalo de confianza.

Debido a que las poblaciones no se aproximan a una distribución normal, no se puede aplicar una prueba paramétrica; es por ello por lo que se hace necesario utilizar una prueba no paramétrica, específicamente el Test de Friedman en el que no se requiere cumplir la condición de normalidad o de homocedasticidad (igualdad de varianzas). Mediante este análisis plasmado en la Tabla 10, se obtiene que el *p-value* es igual a cero, es decir, que existe diferencia entre las poblaciones, mostrando que VGG16 es superior a las demás arquitecturas.

**Figura 24.** Gráfico de residuos**Figura 25.** Gráfico de probabilidad normal**Tabla 10.** Resultados estadísticos – Test de Friedman

Ranking	Arquitectura	Rango promedio
1	VGG16	10.68
2	AlexNet	9.28
3	VGG19	9.28
4	DenseNet	6.48
5	MobileNet v2	6.32
6	ResNeXt	6.06
7	ResNet	5.78
8	GoogLeNet	5.16
9	MNASNet	3.96
10	Wide ResNetx	2.00
11	ShuffleNet	1.00

Este mismo resultado se evidencia en el análisis de medias, en el que se aprecia que el intervalo de confianza que se ha construido tanto con el método Fisher LSD (Figura 26) como Tukey HSD (Figura 27), es superior en el caso de VGG16 ya que no se interseca con el de las otras arquitecturas. En el caso del análisis de medianas se observa que la arquitectura VGG16 es superior a la gran mayoría, pero presenta una pequeña intersección con las arquitecturas AlexNet y VGG19 (ver Figura 28).

**Figura 26.** Gráfico de medias – Fisher LSD

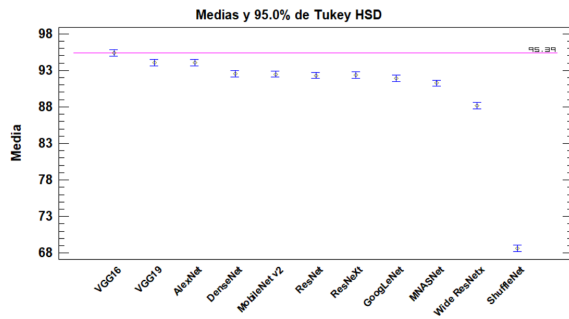


Figura 27. Gráfico de medias – Tukey HSD

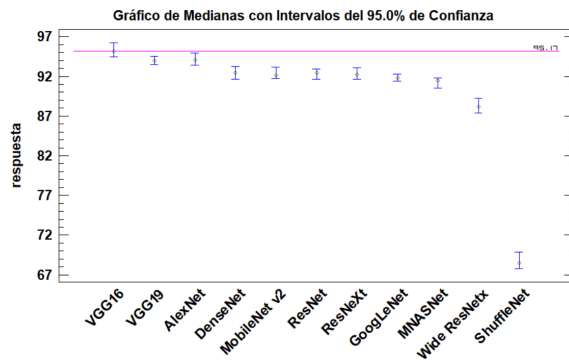


Figura 28. Gráfico de medianas

Adicionalmente, se realizó el análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba con múltiples rangos (ver Tabla 11), en donde si las «X» de los grupos homogéneos se encuentran en la misma columna las arquitecturas se comportan de manera similar, apreciándose que VGG16 es superior y diferente a las demás arquitecturas.

Tabla 11. Prueba de múltiples rangos

Arquitectura	Media	Grupos homogéneos
ShuffleNet	686.560	X
Wide ResNetx	881.820	X
MNASNet	912.540	X
GoogLeNet	919.068	XX
ResNet	923.080	X
ResNeXt	923.704	X
MobileNet v2	924.816	X
DenseNet	925.336	X
AlexNet	940.500	X
VGG19	940.652	X
VGG16	953.756	X

El presente artículo no pretende obtener un «mejor» modelo, sino plantear un mecanismo alternativo frente a las técnicas tradicionales de inteligencia artificial. Sin embargo, con fines académicos, se presentan los resultados del modelo que obtuvo prestaciones más altas, es decir, VGG16, cuya arquitectura original se aprecia en la Figura 10, por lo que la arquitectura final queda definida como se detalla en la Figura 29.

En esta arquitectura se aprecia que la entrada está representada por las imágenes de 328×288 píxeles, las cuales ingresan a la red neuronal convolucional previamente entrenada VGG16, compuesta por trece capas convoluciones seguidas por tres capas totalmente conectadas, las dos primeras presentan 4096 canales y la última 1000, por lo que esta fue editada para poder realizar una clasificación binaria (2 canales). Las capas ocultas utilizan la función de activación ReLU además de diversos kernels 3×3 . Finalmente, se obtiene como salida la clasificación entre ambas clases, es decir, líneas y subestaciones.

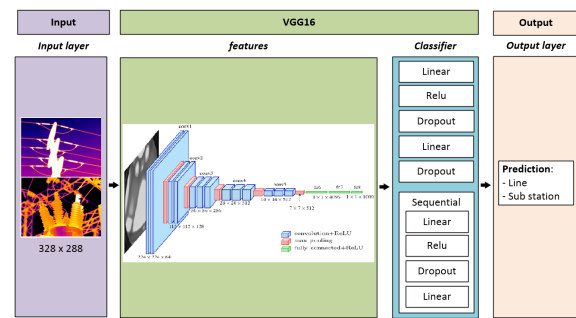


Figura 29. Propuesta de arquitectura de transfer learning para la clasificación de imágenes térmicas

Con este modelo se obtuvieron precisiones de 95.91 % y 91.41 % en el entrenamiento y validación (Figura 30). Esta arquitectura fue probada con nuevas imágenes pertenecientes al conjunto de datos de prueba, el resultado obtenido fue 94.43 % de exactitud para la categoría Líneas, y 92.81 % para las subestaciones. Esta se puede apreciar en la matriz de confusión plasmada en la Figura 31.

Se representó gráficamente la exactitud del modelo mediante la curva característica de operación del receptor (ROC), cuya área bajo la curva (AUC) muestra un valor del 94 %, lo cual es indicio de un alto rendimiento de la arquitectura propuesta en la clasificación de las imágenes térmicas (ver Figura 32).

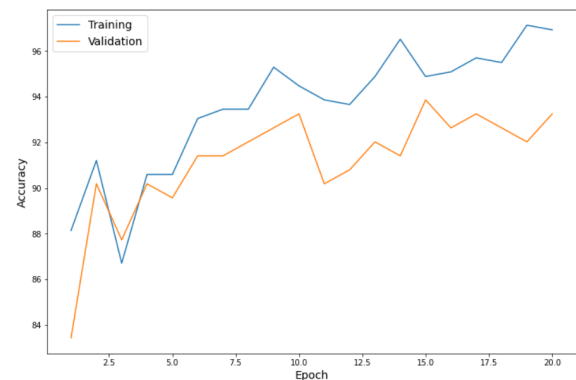


Figura 30. Accuracy: entrenamiento y validación del modelo

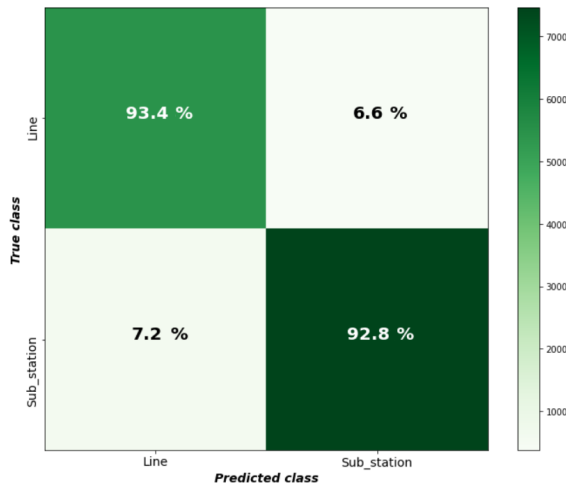


Figura 31. Matriz de confusión

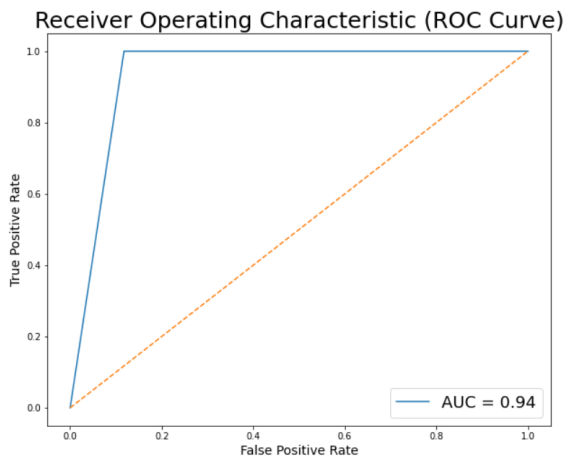


Figura 32. Curva ROC

Finalmente, en la Figura 33 se muestran algunos ejemplos de las predicciones del modelo. En el lado izquierdo del título de cada imagen se representa la clasificación real, y en el lado de la derecha, la obtenida por el modelo.

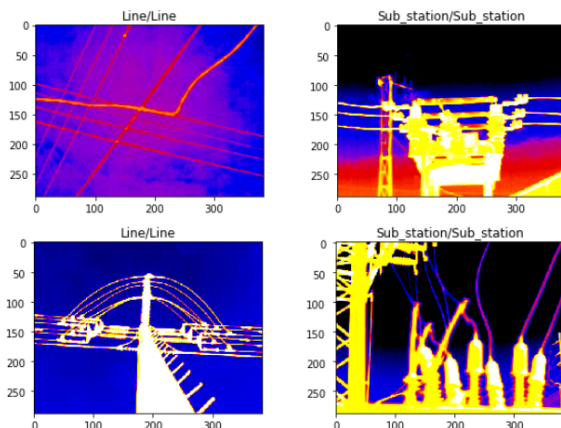


Figura 33. Predicciones del modelo

4. Conclusiones

En este trabajo se han analizado once redes neuronales previamente entrenadas, mediante el uso del paradigma de *transfer learning* basado en el *fine-tuning* del modelo aplicado a la clasificación binaria de imágenes térmicas. El objetivo final no es encontrar un «mejor» modelo, sino plantear alternativas frente al uso de técnicas tradicionales de inteligencia artificial, buscando un ahorro de tiempo y carga computacional.

Los resultados de los modelos arrojan precisiones entre 79.14 % y 98.15 %, valores de F1-score entre 85.91 % y 95.11 % en las arquitecturas previamente entrenadas; estos resultados son indicio que el uso de técnicas de *transfer learning* supone una alternativa confiable como mecanismo de clasificación de imágenes térmicas en el sector eléctrico; sin embargo, se recomienda realizar un análisis específico en cada caso de aplicación particular.

El uso de data augmentation, transformaciones y normalización de las imágenes, son aspectos importantes para mejorar el rendimiento del modelo; mientras que la división del conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento, validación y pruebas mediante la técnica de tipo *hold-out* ayudó a evitar el sobreajuste, generalizar el modelo y, por lo tanto, realizar predicciones más precisas. Sin embargo, con la finalidad de realizar una comparación más justa, el estudio también incluyó la aplicación de una validación cruzada con 5-folds, además de la realización de un análisis estadístico mediante el test de Friedman.

Agradecimientos

Daniel Pérez-Aguilar reconoce el apoyo financiero del Proyecto CONCYTEC-Banco Mundial, a través de su unidad ejecutora, el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT), en el marco de la convocatoria E033-2018-01-BM del Contrato N.º 06-2018-FONDECYT/BM, para su trabajo de investigación denominado Transfer learning en la clasificación binaria de imágenes térmicas, ejecutado como parte del programa de doctorado en Ingeniería con mención en Automatización, Control y Optimización de Procesos, desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Automáticos de Control de la Universidad de Piura, Perú.

Referencias

- [1] M. Haenlein and A. Kaplan, "A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence," *California Management Review*, vol. 61, no. 4, pp. 5–14, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0008125619864925>

- [2] M. Flasiński, *Introduction to artificial intelligence*. Springer International Publishing, 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-40022-8>
- [3] M.-H. Huang and R. T. Rust, “Artificial intelligence in service,” *Journal of Service Research*, vol. 21, no. 2, pp. 155–172, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1094670517752459>
- [4] Z. Aung, I. S. Mikhaylov, and Y. T. Aung, “Artificial intelligence methods application in oil industry,” in *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 563–567. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039330>
- [5] T. P. Carvalho, F. A. A. M. N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J. ao P. Basto, and S. G. S. Alcalá, “A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, p. 106024, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- [6] S. Wan, L. Qi, X. Xu, C. Tong, and Z. Gu, “Deep learning models for real-time human activity recognition with smartphones,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 743–755, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01445-x>
- [7] V. Golodov, A. Zavei-Boroda, S. Ivanov, and K. Nikolskaya, “Development of a deep learning neural network for human movements analysis,” in *2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*, 2017, pp. 72–74. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RPC.2017.8168071>
- [8] E. A. Galindo, J. A. Perdomo, and J. C. Figueroa-García, “Estudio comparativo entre máquinas de soporte vectorial multiclase, redes neuronales artificiales y sistema de inferencia neuro-difuso autoorganizado para problemas de clasificación,” *Información tecnológica*, vol. 31, pp. 273–286, 02 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100273>
- [9] A. Brunetti, D. Buongiorno, G. F. Trotta, and V. Bevilacqua, “Computer vision and deep learning techniques for pedestrian detection and tracking: A survey,” *Neurocomputing*, vol. 300, pp. 17–33, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.01.092>
- [10] I. Yildiz, P. Tian, J. Dy, D. Erdoğmuş, J. Brown, J. Kalpathy-Cramer, S. Ostmo, J. Peter Campbell, M. F. Chiang, and S. Ioannidis, “Classification and comparison via neural networks,” *Neural Networks*, vol. 118, pp. 65–80, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.06.004>
- [11] Y. Jung, “Multiple predicting k-fold cross-validation for model selection,” *Journal of Nonparametric Statistics*, vol. 30, no. 1, pp. 197–215, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10485252.2017.1404598>
- [12] F. Pacheco, J. Valente de Oliveira, R.-V. Sánchez, M. Cerrada, D. Cabrera, C. Li, G. Zurita, and M. Artés, “A statistical comparison of neuroclassifiers and feature selection methods for gearbox fault diagnosis under realistic conditions,” *Neurocomputing*, vol. 194, pp. 192–206, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.02.028>
- [13] D. W. Zimmerman and B. D. Zumbo, “Relative power of the Wilcoxon test, the Friedman test, and repeated-measures ANOVA on ranks,” *The Journal of Experimental Education*, vol. 62, no. 1, pp. 75–86, 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00220973.1993.9943832>
- [14] C. Lile and L. Yiqun, “Anomaly detection in thermal images using deep neural networks,” in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 2299–2303. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296692>
- [15] A. Dragomir, M. Adam, M. Andrușcă, A. Munteanu, and E. Boghiu, “Considerations regarding infrared thermal stresses monitoring of electrical equipment,” in *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 2017, pp. 100–103. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2017.8123307>
- [16] F. Fambrini, Y. Iano, D. G. Caetano, A. A. D. Rodríguez, C. Moya, E. Carrara, R. Arthur, F. C. Cabello, J. V. Zubem, L. M. Del Val Cura, J. a. B. Destro Filho, J. R. Campos, and J. H. Saito, “Gpu cuda jseg segmentation algorithm associated with deep learning classifier for electrical network images identification,” *Procedia Computer Science*, vol. 126, pp. 557–565, 2018, knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 22nd International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.290>
- [17] X. W. X. L. Z. J. Wenzhen Yang, Jiali Luo and Z. Pan, “Image tactile perception with an improved jseg algorithm,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 14,

- no. 1, p. 77, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23940/ijpe.18.01.p9.7788>
- [18] I. Ullah, F. Yang, R. Khan, L. Liu, H. Yang, B. Gao, and K. Sun, "Predictive maintenance of power substation equipment by infrared thermography using a machine-learning approach," *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en10121987>
- [19] H. Ramchoun, Y. Ghanou, M. Ettaouil, and M. A. J. Idrissi, "Multilayer perceptron: Architecture optimization and training," *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, 2016. [Online]. Available: <http://doi.org/10.9781/ijimai.2016.415>
- [20] A. S. Nazmul Huda, S. Taib, M. S. Jadin, and D. Ishak, "A semi-automatic approach for thermographic inspection of electrical installations within buildings," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 585–591, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.014>
- [21] C. Yuan, X. Sun, and R. Lv, "Fingerprint liveness detection based on multi-scale OPQ and PCA," *China Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 60–65, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CC.2016.7559076>
- [22] H. Zou and F. Huang, "A novel intelligent fault diagnosis method for electrical equipment using infrared thermography," *Infrared Physics & Technology*, vol. 73, pp. 29–35, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.08.019>
- [23] S.-S. Yu, S.-W. Chu, C.-M. Wang, Y.-K. Chan, and T.-C. Chang, "Two improved k-means algorithms," *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 747–755, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.08.032>
- [24] T. V. Phan, S. Sultana, T. G. Nguyen, and T. Bauschert, "Q - transfer: A novel framework for efficient deep transfer learning in networking," in *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, 2020, pp. 146–151. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065240>
- [25] M. Ebrahim, M. Al-Ayyoub, and M. A. Alsmirat, "Will transfer learning enhance imagenet classification accuracy using imagenet-pretrained models?" in *2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, 2019, pp. 211–216. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IACS.2019.8809114>
- [26] T. Alshalali and D. Josyula, "Fine-tuning of pre-trained deep learning models with extreme learning machine," in *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2018, pp. 469–473. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CSCI46756.2018.00096>
- [27] G. Vrbancić and V. Podgorelec, "Transfer learning with adaptive fine-tuning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196 197–196 211, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034343>
- [28] T. Kaur and T. K. Gandhi, "Automated brain image classification based on vgg-16 and transfer learning," in *2019 International Conference on Information Technology (ICIT)*, 2019, pp. 94–98. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICIT48102.2019.00023>
- [29] R. L. Gálvez, E. P. Dadios, A. A. Bandalá, and R. R. P. Vicerra, "Threat object classification in X-ray images using transfer learning," in *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666344>
- [30] D. Xue, X. Zhou, C. Li, Y. Yao, M. M. Rahaman, J. Zhang, H. Chen, J. Zhang, S. Qi, and H. Sun, "An application of transfer learning and ensemble learning techniques for cervical histopathology image classification," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 104 603–104 618, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999816>
- [31] E. Cengil and A. Çinar, "Multiple classification of flower images using transfer learning," in *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875953>
- [32] J. R. Rajayogi, G. Manjunath, and G. Shobha, "Indian food image classification with transfer learning," in *2019 4th International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solution (CSITSS)*, vol. 4, 2019, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CSITSS47250.2019.9031051>
- [33] H. Shao, M. Xia, G. Han, Y. Zhang, and J. Wan, "Intelligent fault diagnosis of rotor-bearing system under varying working conditions with modified transfer convolutional neural network and thermal images," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17,

- no. 5, pp. 3488–3496, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3005965>
- [34] O. Janssens, R. Van de Walle, M. Locufier, and S. Van Hoecke, “Deep learning for infrared thermal image based machine health monitoring,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 1, pp. 151–159, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2722479>
- [35] T. Carneiro, R. V. Medeiros Da Nóbrega, T. Nepomuceno, G.-B. Bian, V. H. C. De Albuquerque, and P. P. R. Filho, “Performance analysis of google colab as a tool for accelerating deep learning applications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61 677–61 685, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2874767>
- [36] A. S. N. Huda and S. Taib, “Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 61, pp. 184–191, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.04.012>
- [37] M. S. Jadin, S. Taib, and K. H. Ghazali, “Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations,” *Measurement*, vol. 57, pp. 15–24, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.07.010>
- [38] W. I. Technology, *ThermoPro TP8S™ IR Thermal Camera. User Manual*. Wuhan Guide Infrared Technology Co., Ltd., 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bVGd0u>
- [39] L. Sandjakoska and F. Stojanovska, “How initialization is related to deep neural networks generalization capability: Experimental study,” in *2020 55th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, 2020, pp. 163–166. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEST49890.2020.9232882>
- [40] C. Heghedus, A. Chakravorty, and C. Rong, “Neural network frameworks. comparison on public transportation prediction,” in *2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, 2019, pp. 842–849. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2019.00138>
- [41] A. A. Almisreb, N. Jamil, and N. M. Din, “Utilizing alexnet deep transfer learning for ear recognition,” in *2018 Fourth International Conference on Information Retrieval and Knowledge Management (CAMP)*, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INFRKM.2018.8464769>
- [42] S. Liu and W. Deng, “Very deep convolutional neural network based image classification using small training sample size,” in *2015 3rd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, 2015, pp. 730–734. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACPR.2015.7486599>
- [43] J. Xiao, J. Wang, S. Cao, and B. Li, “Application of a novel and improved VGG-19 network in the detection of workers wearing masks,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1518, p. 012041, apr 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1518/1/012041>
- [44] A. Budhiman, S. Suyanto, and A. Arifianto, “Melanoma cancer classification using resnet with data augmentation,” in *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 2019, pp. 17–20. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISRITI48646.2019.9034624>
- [45] K. Zhang, Y. Guo, X. Wang, J. Yuan, and Q. Ding, “Multiple feature reweight densenet for image classification,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9872–9880, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2890127>
- [46] T. Fang, “A novel computer-aided lung cancer detection method based on transfer learning from googlenet and median intensity projections,” in *2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, 2018, pp. 286–290. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCET.2018.8542189>
- [47] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, “Going deeper with convolutions,” in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
- [48] GeeksforGeeks. (2020) Understanding googlenet model - CNN architecture. [Online]. Available: <https://bit.ly/2RLmiuc>
- [49] K. Fu, L. Sun, X. Kang, and F. Ren, “Text detection for natural scene based on mobilenet V2 and U-net,” in *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2019, pp. 1560–1564. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816384>

- [50] C. Qiu, M. Schmitt, H. Taubenböck, and X. X. Zhu, "Mapping human settlements with multi-seasonal sentinel-2 imagery and attention-based resnext," in *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 2019, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JURSE.2019.8809009>
- [51] S. Zagoruyko and N. Komodakis, "Wide residual networks," in *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, E. R. H. Richard C. Wilson and W. A. P. Smith, Eds. BMVA Press, September 2016, pp. 87.1–87.12. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.5244/C.30.87>
- [52] M. Tan, B. Chen, R. Pang, V. Vasudevan, M. Sandler, A. Howard, and Q. V. Le, "Mnasnet: Platform-aware neural architecture search for mobile," in *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 2815–2823. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00293>
- [53] Y. Li and C. Lv, "Ss-yolo: An object detection algorithm based on YOLOv3 and shufflenet," in *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, vol. 1, 2020, pp. 769–772. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9085091>
- [54] PyTorch. (2019) TORCHVISION.MODELS. [Online]. Available: <https://bit.ly/2QSClGe>
- [55] X. Song, Y. Du, and J. Jackson, "An empirical study on hyperparameters and their interdependence for RL generalization," *arXiv preprint arXiv*, vol. abs/1906.00431, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ulY3zZ>
- [56] J. N. van Rijn and F. Hutter, "Hyperparameter importance across datasets," in *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, ser. KDD '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, pp. 2367–2376. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3219819.3220058>
- [57] A. Aravkin, J. V. Burke, A. Chiuso, and G. Pillonetto, "On the estimation of hyperparameters for empirical bayes estimators: Maximum marginal likelihood vs minimum MSE," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 16, pp. 125–130, 2012, 16th IFAC Symposium on System Identification. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3182/20120711-3-BE-2027.00353>
- [58] A. Mikolajczyk and M. Grochowski, "Data augmentation for improving deep learning in image classification problem," in *2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW)*, 2018, pp. 117–122. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388338>
- [59] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, "A survey on image data augmentation for deep learning," *Journal of Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 60, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>
- [60] D. Avola, L. Cinque, G. L. Foresti, F. Lamacchia, M. R. Marini, L. Perini, K. Qorraj, and G. Telesca, "A shape comparison reinforcement method based on feature extractors and f1-score," in *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2019, pp. 2155–2159. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914601>
- [61] J. Amat Rodrigo. (2020) Validación de modelos predictivos: Cross-validation, one-leaveout, bootstrapping. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bYgPHk>



MODELO SIMPLIFICADO DE UNA INTERFAZ DE CONEXIÓN A LA RED BASADA EN UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE RED EN RÉGIMEN DINÁMICO

SIMPLIFIED MODEL OF A GRID-CONNECTION INTERFACE BASED ON POWER ELECTRONIC CONVERTER FOR GRID STUDIES IN DYNAMIC REGIME

Danny Ochoa^{1,*} 

Recibido: 02-02-2021, Recibido tras revisión: 09-04-2021, Aceptado: 22-04-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

El cambio de paradigma experimentado por los sistemas eléctricos a nivel mundial ha propiciado una participación masiva de nuevos agentes energéticos: generación, almacenamiento y consumo. En la mayoría de los casos, estos agentes están dotados de convertidores electrónicos de potencia (CEP) para verter su energía a la red. Esta realidad ha impulsado el desarrollo de modelos analíticos muy sofisticados y detallados de CEP para estudiar el impacto de su interacción con la red en un entorno de simulación. No obstante, cuando se trata de estudiar redes de gran dimensión o con sus componentes desagregados, la enorme carga computacional requerida para simular un modelo detallado podría suponer una limitante para la realización de tales estudios. En este artículo se propone el diseño de un modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en CEP, útil para estudios de red mediante MATLAB/Simulink®. El modelo está concebido para representar, con una precisión numérica razonable, el comportamiento dinámico que tendrían ciertas variables eléctricas de interés de un modelo detallado y, al mismo tiempo, para conseguir una reducción significativa del tiempo de cómputo. Un análisis comparativo de los resultados numéricos, las dinámicas generadas y el tiempo de convergencia de los dos modelos permite validar la propuesta. Estos hitos conseguidos permiten cumplimentar los objetivos planteados en esta investigación.

Palabras clave: convertidor electrónico de potencia, conversión de energía, modulación por ancho de pulso, sistemas eléctricos de potencia

Abstract

The paradigm change experienced by worldwide power systems has led to a massive participation of new energy agents: generation, storage, and consumption. In most cases, these agents are equipped with power electronic converters (PEC) to incorporate their energy to the grid. This reality has motivated the development of highly sophisticated and detailed PEC analytical models that accurately represent their dynamics and enable to study their impact on the grid in a simulation environment. However, when it comes to studying large-scale power systems or with all their components disaggregated, the huge computational burden required to simulate a detailed model could make these studies unfeasible. This paper proposes the design of a simplified model of a grid-connection interface based on PEC for power system analysis using MATLAB/Simulink®. The model is designed to represent, with reasonable numerical accuracy, the dynamic behavior of certain electrical variables of interest that would produce a detailed model and, at the same time, to achieve a noticeable reduction in the computation time. A comparative analysis of the numerical results, the dynamics generated, and the convergence time achieved by the two models enable to validate the proposal. These milestones make it possible to fulfill the objectives of this research.

Keywords: Energy Conversion, Power Electronic Converter, Power Systems, Pulse Width Modulation

^{1,*}Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: danny.ochoac@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Ochoa, D. (2021). «Modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en un convertidor electrónico de potencia para estudios de red en régimen dinámico». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 87-98. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.08>.

1. Introducción

En las últimas décadas, los sistemas eléctricos de potencia han venido experimentando un cambio de paradigma que los ha obligado a pasar de un modelo de generación predominantemente centralizado a un modelo de generación más distribuido e incluso a un modelo de red eléctrica inteligente, junto con la inclusión de nuevos agentes energéticos de generación, de almacenamiento y de consumo [1, 2]. En el marco de esta transición, cada vez se han ido integrado más generadores eléctricos renovables, vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento energético, entre otros, cuya interfaz de conexión a la red está basada en convertidores electrónicos de potencia (Figura 1).

Esto debido a que la electricidad generada/consumida por estos agentes es incompatible con la red en términos del tipo de energía (corriente continua o corriente alterna), la amplitud y la frecuencia de la tensión, etc. La necesidad de emplear convertidores electrónicos para verter la energía proveniente de generadores renovables (por ejemplo, eólicos o fotovoltaicos) a la red obedece a criterios de obtención de la máxima eficiencia en la conversión del recurso energético primario en energía eléctrica [3, 4]. En el caso de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos, la energía suministrada a las baterías es manejada por convertidores electrónicos de potencia con el objeto de garantizar la eficiencia del proceso y salvaguardar la vida útil de las mismas [5].

Situación similar se aplica para los sistemas de almacenamiento energético en baterías, en cuyo caso, el flujo energético puede ir de la batería a la red o al revés en función de la necesidad de la red en disponer o almacenar energía [6]. Los convertidores electrónicos de potencia poseen una topología que permite un flujo bidireccional de potencia activa y reactiva en función de las señales de consigna preestablecidas en los sistemas de control que gobiernan la lógica de disparo de los semiconductores que los conforman. Por tanto, desde la perspectiva de la red, estas interfaces se comportan como fuentes controladas de corriente [7].

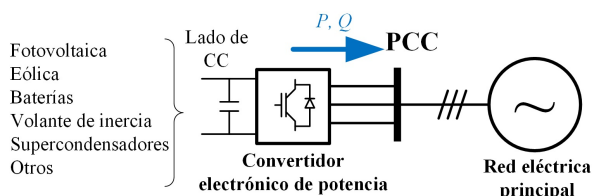


Figura 1. Convertidor electrónico de potencia conectado a la red

En la operación de un sistema eléctrico de potencia en régimen dinámico, una participación reducida de generadores renovables con interfaz de conexión a la red basada en convertidores electrónicos de potencia

no supone un problema severo de estabilidad (de frecuencia y tensión), pues, esta labor es llevada a cabo de forma exitosa por la generación síncrona convencional. Sin embargo, a medida que esta integración se masifica (en sustitución de la generación síncrona), la red empieza a sufrir una disminución de sus características inerciales y, en consecuencia, la generación eléctrica convencional operativa puede resultar insuficiente para garantizar la estabilidad del sistema en caso de suscitarse alguna falla o contingencia [8].

Esta situación es de enorme preocupación en sistemas eléctricos débiles y aislados, en los cuales la cuota de participación de la generación renovable en el mix energético es equiparable o supera a la generación convencional, tal como lo muestran estudios publicados en [9–11]. No obstante, muchas de las soluciones que se proponen en la literatura para mitigar los inconvenientes antes expuestos están basados justamente en la utilización de más convertidores electrónicos, normalmente, asociados a sistemas de almacenamiento energético (baterías, volantes de inercia, supercondensadores, entre otros).

Con esta exposición inicial se pretende mostrar el protagonismo que han cobrado los convertidores electrónicos de potencia en la operación de un sistema eléctrico, el cual ha motivado el desarrollo de modelos muy detallados y completos concebidos para emular su comportamiento dinámico e interacción con la red y para ser utilizado en estudios basados en simulación por computadora [12, 13]. No obstante, cuando el objeto de un estudio es el análisis dinámico de redes de gran dimensión o de sistemas eléctricos con todos sus componentes desagregados, la enorme carga computacional requerida para simular modelos detallados de convertidores dentro de un rango temporal comprendido desde los pocos segundos hasta un par de minutos (tiempo en el que se manifiestan los fenómenos físicos relacionados con la estabilidad de frecuencia/tensión en la red) podría limitar, en gran medida, la realización de este tipo de estudios.

Esta situación ha motivado la búsqueda de alternativas metodológicas que permitan modelar a los convertidores electrónicos de potencia de una forma menos compleja sin que esto perjudique su exactitud numérica respecto a los resultados que brindaría un modelo detallado tradicional. Por ejemplo, recientes trabajos publicados en [14–17] presentan técnicas efectivas para conseguir una simplificación significativa de la lógica de control de los convertidores electrónicos de potencia, todas estas basadas en el control predictivo de estados finitos basado en el modelo FCS-MPC, (por sus siglas en inglés).

Los resultados reportados en estas contribuciones muestran que el control de los convertidores mediante FCS-MPC permiten acortar el tiempo de ejecución de los lazos de control en comparación con aquel asociado a la implementación de controladores lineales clásicos.

cos sin que exista penalización en su rendimiento. Sin embargo, este beneficio trae consigo la necesidad de realizar un mayor número de cálculos para cumplir con los objetivos de control. Para apalejar esta situación, en estos artículos se proponen diferentes diseños de convertidores matriciales orientados a reducir el número de sectores necesarios para la descomposición vectorial de la tensión trifásica en el punto de conexión común, ya sea mediante una simplificación de la formulación empleada [15–17] o por medio de la utilización de tablas de búsqueda que agilicen el proceso de cálculo [14].

Un hecho que guardan en común estas contribuciones científicas es que las simplificaciones propuestas centran sus esfuerzos en optimizar la lógica de control del convertidor, pero manteniendo una representación detallada del inversor trifásico (puente de 6 o 9 transistores de potencia). En cambio, en [18] se plantea una idea de simplificación enfocada en el inversor trifásico, representado mediante un puente de seis fuentes controladas de corriente, moduladas mediante SPWM, cuyos réditos computacionales son latentes según lo evidencian los resultados reportados. Estos vislumbran también que las bondades obtenidas al simplificar la representación analítica del inversor trifásico son mermadas, en cierta medida, al utilizarse una técnica de modulación por ancho de pulso para el control de las fuentes de corriente controladas, la cual demanda de un importante esfuerzo computacional para su implementación. Es aquí en donde se ha identificado la brecha de investigación que ha dado lugar al planteamiento de la presente propuesta.

Con el objeto de conseguir un grado mayor de simplificación, al tiempo de mantener un compromiso entre la simplicidad y la exactitud, se propone el desarrollo de un modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en convertidores electrónicos de potencia para ser utilizado en estudios de red en régimen dinámico en el entorno de simulación MATLAB/Simulink®. El inversor trifásico es representado por tres fuentes de corriente controladas que son gobernadas por una pareja de controladores lineales en coordenadas $d-q$ diseñada para los efectos de esta investigación. Para ello, se toma como referencia la base teórica del principio de operación del modelo detallado de un convertidor electrónico de potencia completo y su implementación en el programa de simulación.

2. Materiales y métodos

La investigación desarrollada en este trabajo es del tipo experimental, por cuanto los experimentos, conducidos en un entorno de simulación por computadora, se realizan bajo condiciones controladas [19].

En primera instancia, se presenta la base teórica y la implementación de un modelo detallado de un convertidor electrónico de potencia (CEP). Luego se

plantea el desarrollo del modelo simplificado concebido para emular el comportamiento dinámico que tendría el modelo detallado, desde el punto de vista de la red, dentro del horizonte temporal de interés delimitado en esta investigación. Al mismo tiempo, se busca conseguir una reducción significativa del esfuerzo computacional requerido para representar la dinámica de determinadas variables eléctricas manejadas por el CEP en la simulación. Estos son los objetivos principales de la investigación.

2.1. Representación detallada de un convertidor electrónico de potencia

La Figura 2 muestra la configuración típica de un CEP conectado a la red. En la ilustración, es posible distinguir dos subsistemas: el inversor trifásico y su controlador de potencia PQ. El inversor, constituido por un puente de semiconductores de potencia (SCR, MOSFET, IGBT, u otros, según la aplicación), tiene por función convertir la energía proveniente de un sistema de corriente continua (CC) en energía en corriente alterna (CA) para su posterior vertido a la red trifásica, o viceversa. Según qué interruptores estén activados en cada instante de tiempo, el puente irá construyendo una señal de tensión trifásica en sus bornes cuya frecuencia fundamental será heredada de la tensión impuesta por la red en el punto de conexión común (PCC, por sus siglas en inglés) y, cuya amplitud y fase estarán definidas según qué corriente es necesaria inyectar para conseguir un valor predeterminado de potencia activa y reactiva en el PCC por parte del convertidor.

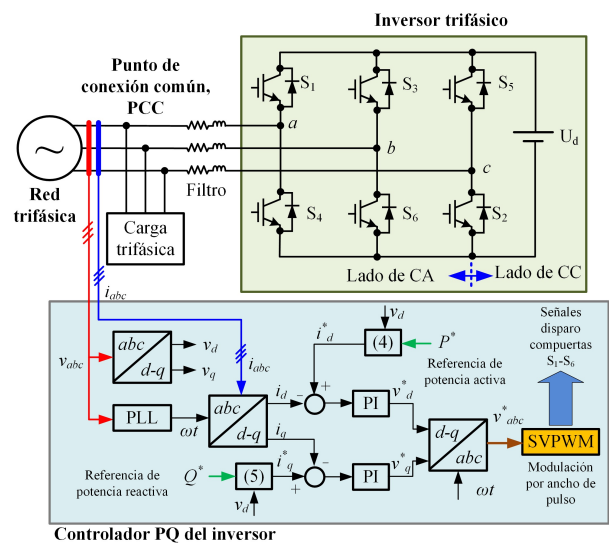


Figura 2. Configuración típica de un CEP trifásico conectado a la red

La secuencia de disparos aplicada a cada uno de los seis semiconductores del inversor se consigue mediante técnicas de modulación por ancho de pulso, cuyo

principio se expone en la sección 2.1.1, mientras que, las labores de control de la potencia activa y reactiva inyectada se llevan a cabo mediante un esquema de control PQ similar a aquel mostrado en el subsistema inferior de la Figura 2, cuyos criterios se explican con algo más de detalle en la sección 2.1.2. Además, es preciso indicar que, con el objeto de reducir el contenido armónico de la señal de corriente inyectada por el CEP en el PCC, esta topología suele estar acompañada de un filtro pasivo trifásico de primer orden como se aprecia en la figura.

2.1.1. Modulación de ancho de pulso mediante vectores espaciales (SVPWM)

Para la generación de las señales de disparo de compuerta de los transistores que componen la topología del CEP, hoy en día se encuentran disponibles muchas técnicas con una gran aplicabilidad y alto grado de madurez, tales como: modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), PWM con eliminación selectiva de armónicos (SE-PWM), PWM con portadora sinusoidal (SPWM) y PWM mediante vectores espaciales (SVPWM) [20–22]. Con los recientes avances en la industria de los semiconductores, microprocesadores y en el procesamiento digital de señales, las técnicas de modulación por ancho de pulso mediante vectores espaciales se utilizan ampliamente en los CEP para aplicaciones de generación eléctrica debido a su mayor flexibilidad en el control, menor contenido armónico y mejor desempeño dinámico [22, 23].

De forma general, la SVPWM es una técnica de modulación digital en la que un vector de referencia muestreado se sintetiza mediante un número apropiado de vectores de estado conmutados en determinados instantes de tiempo. Los vectores, tanto de referencia como los de estado conmutados, se representan en un plano complejo mediante una transformación de un marco referencial trifásico abc a un marco referencial de coordenadas $\alpha - \beta$. Para brindar al lector una primera aproximación al método, considérese el inversor trifásico mostrado en la Figura 2. Esta topología ofrece ocho estados de conmutación, los cuales, están arreglados de acuerdo con la secuencia a, b, c . Partiendo de la premisa de que en cada una de las tres ramas del puente de transistores puede estar activo (o en conducción) solamente uno de ellos, se procede a definir el estado de conmutación 1 cuando el transistor superior de la rama está activado y 0 cuando lo hace el transistor inferior de la misma.

Si se define a la tensión en el lado de CC del inversor como U_d , el inversor es capaz de ofrecer en sus terminales los valores de tensión (de fase V_A , V_B y V_C , y de línea V_{AB} , V_{BC} , V_{CA}) que se indican en la Tabla 1. Ahora bien, el orden de selección de cada una de las ocho combinaciones de conmutación y el tiempo en el que estas deben mantenerse activas es lo que

define la técnica SVPWM. La Figura 3 proporciona una idea gráfica de la mecánica de construcción del vector de tensión en los bornes del inversor, V_n , sobre el plano complejo estacionario $\alpha - \beta$. Este vector es descompuesto en ocho estados de conmutación: V_0 a V_7 , de los cuales, V_1 - V_6 son vectores activos que forman un hexágono regular (seis sectores) y, V_0 y V_7 son vectores nulos que reposan en el centro del hexágono. Una descripción detallada del marco teórico de esta técnica de modulación, el cálculo de los tiempos de conmutación para cada uno de los sectores y los criterios de implementación, pueden consultarse en [12, 13, 24].

Tabla 1. Características de las arquitecturas utilizadas

Estado			Tensiones en bornes del inversor						
a	b	c	V_A	V_B	V_C	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	$-U_d/3$	$-U_d/3$	$2U_d/3$	0	$-U_d$	U_d	
0	1	0	$-U_d/3$	$2U_d/3$	$-U_d/3$	$-U_d$	U_d	0	
0	1	1	$-2U_d/3$	$U_d/3$	$U_d/3$	$-U_d$	0	U_d	
1	0	0	$2U_d/3$	$-U_d/3$	$-U_d/3$	U_d	0	$-U_d$	
1	0	1	$U_d/3$	$-2U_d/3$	$U_d/3$	U_d	$-U_d$	0	
1	1	0	$U_d/3$	$U_d/3$	$-2U_d/3$	0	U_d	$-U_d$	
1	1	1	0	0	0	0	0	0	

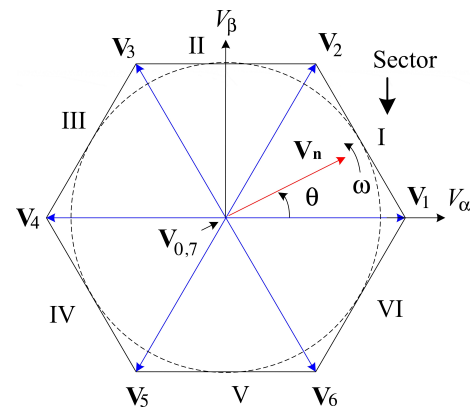


Figura 3. Modulación SVPWM

2.1.2. Control de potencia PQ

Para la mayoría de las aplicaciones industriales de los CEP, el control de potencia activa y reactiva se lleva a cabo mediante la transformación del vector trifásico de tensión y de corriente en vectores expresados en componentes de un sistema coordenado rotativo, en donde el vector de la variable se descompone en un vector de eje directo y en otro de cuadratura ($d - q$) [25]. De la teoría de los sistemas eléctricos de potencia, el operador que permite transformar la representación de las variables eléctricas trifásicas abc a un marco referencial de coordenadas $d - q$ es la transformada de Park, tal y como se indica en (1). En esta ecuación,

expresada para la corriente, i_d , i_q e i_0 son las componentes en eje directo, en cuadratura y homopolar ($dq0$), respectivamente, de las corrientes trifásicas i_a , i_b e i_c . ω es la pulsación angular de la red, que es la velocidad angular a la que gira el sistema coordenado $d-q$. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de descomposición del vector corriente, \mathbf{I} , en las componentes: \mathbf{I}_d e \mathbf{I}_q . Se puede aplicar un razonamiento similar para la tensión.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos (\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin (\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}}_{\text{Transformada de park}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

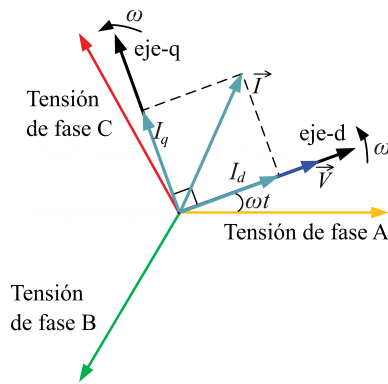


Figura 4. Sistema coordenado $d-q$

En la literatura se ha demostrado que el cálculo de las potencias instantáneas en un sistema trifásico puede realizarse por medio del cómputo de las variables instantáneas de tensión y corriente expresadas en coordenadas $d-q$, como sigue [26]:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2)$$

$$Q = \frac{3}{2} (-v_d i_q + v_q i_d) \quad (3)$$

Donde:

v_d e i_d : tensión y corriente instantánea en eje directo.

v_q e i_q : tensión y corriente instantánea en eje en cuadratura.

Por conveniencia analítica, en este trabajo se forzará a que el eje directo del sistema coordenado $d-q$ esté alineado con el vector tensión de fase, de tal forma que se consiga hacer la componente $v_q = 0$ y, además, que $v_d = |\mathbf{V}| = V$. Con este arreglo, las potencias instantáneas quedan definidas de la siguiente manera:

$$P = \frac{3}{2} V i_d \quad (4)$$

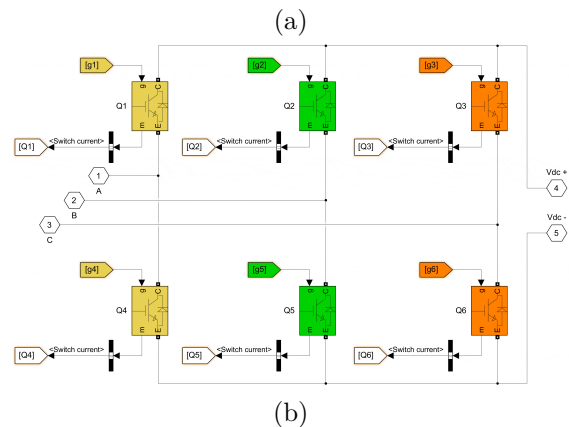
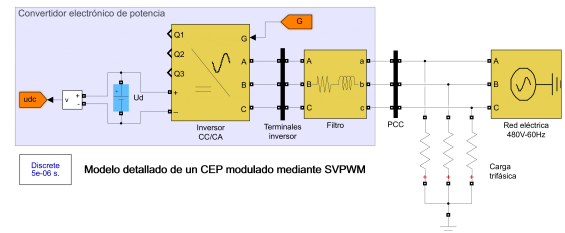
$$Q = -\frac{3}{2} V i_q \quad (5)$$

Este último par de expresiones vislumbra las ventajas de emplear las coordenadas $d-q$ para el control de la potencia inyectada por el CEP a la red, pues, la regulación de la potencia activa dependerá únicamente del manejo de la variable i_d , mientras que, el de la potencia reactiva, estará en función de i_q . Esto significa que el control de potencia P pueden llevarse a cabo de forma desacoplada de las consignas aplicadas al control de potencia Q , siendo necesario para este propósito el diseño de un solo controlador por variable. En el recuadro inferior de la Figura 2 se muestra un ejemplo de implementación del controlador PQ para el inversor trifásico en estudio.

2.2. Implementación del modelo detallado del convertidor electrónico de potencia en MATLAB/Simulink®

En función de lo expuesto en los literales anteriores, en esta sección se presenta la implementación del modelo detallado de un convertidor electrónico de potencia en el entorno de simulación MATLAB/Simulink®. Se define como banco de pruebas la red ilustrada en la Figura 2, cuya implementación en el simulador se muestra en la Figura 5.

Debido a que el interés científico de este trabajo se centra en el estudio de la interacción del convertidor electrónico de potencia con la red, en el lado de CC del inversor se colocará una fuente de tensión ideal, la cual puede representar el recurso energético primario de distintos agentes como: generación fotovoltaica o eólica, volantes de inercia, supercondensadores, banco de baterías, etc.



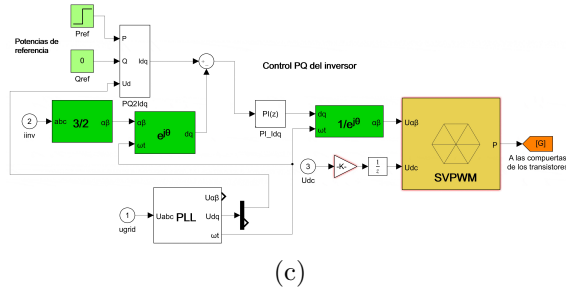


Figura 5. Implementación del CEP en MATLAB/Simulink® (modelo detallado): a) sistema eléctrico de pruebas; b) configuración del inversor y; c) controlador PQ y modulador SVPWM

Los valores asignados a los parámetros de los distintos elementos que constituyen el sistema de pruebas se proporcionan en el Apéndice. Si el lector precisa de mayores detalles para la implementación del convertidor en el simulador, se recomienda consultar [13].

Para evaluar el desempeño del modelo detallado del convertidor electrónico de potencia en el dominio del tiempo en el entorno de simulación, se establece un valor de potencia activa de referencia constante que inicie en 10 kW y, una vez que hayan transcurrido 0,4 s de simulación este cambie a 20 kW. Además, se ha establecido una consigna de la potencia reactiva nula durante el horizonte temporal de simulación, a fin de verificar el control desacoplado PQ que ofrece la filosofía de control mediante coordenadas $d-q$. Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en la simulación.

La Figura 6 ilustra la señal de tensión fase-neutro construida por el inversor trifásico mediante la aplicación de la modulación SVPWM y medida en los terminales del inversor (antes de la etapa de filtrado). Como se aprecia en las gráficas, esta tensión de fase oscila a la frecuencia fundamental de la red (60 Hz) y presenta una componente de alta frecuencia (20 kHz) heredada de la portadora empleada para la modulación por ancho de pulso, la cual, será atenuada al pasar por el filtro R-L serie.

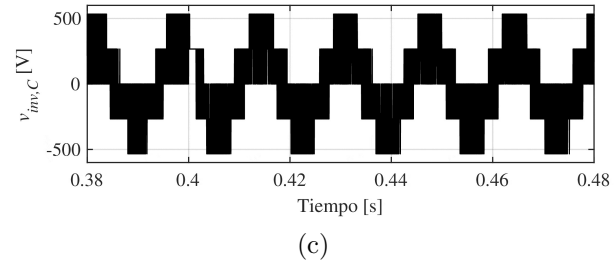
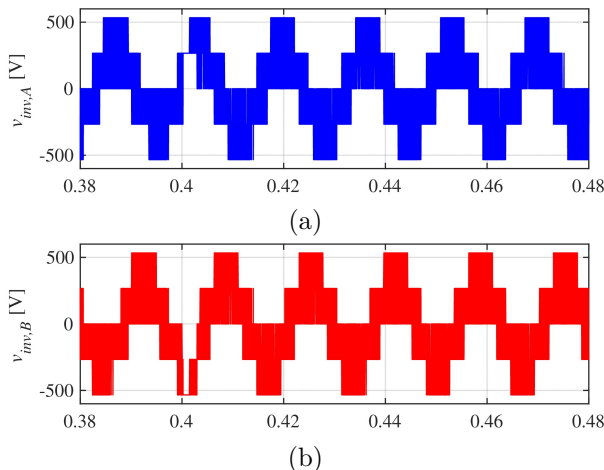


Figura 6. Tensión trifásica generada en bornes del inversor

La Figura 7a muestra la forma de onda de la corriente inyectada por el CEP en el PCC, la cual ha sido construida por el controlador PQ del inversor para el cumplimiento de las consignas de potencia activa y reactiva establecidas. La dinámica en el dominio del tiempo muestra el correcto desempeño del inversor y, además, la efectividad en las labores de filtrado (los valores de distorsión armónica total (THD) se aportan en la misma figura). En base a las mediciones de tensión y corriente en los bornes del CEP se han graficado, además, las dinámicas adoptadas por la potencia activa y reactiva inyectadas en el PCC (Figuras 7b y 7c, respectivamente). Nótese en la Figura 7b cómo el CEP sigue correctamente la consigna de potencia activa establecida en el sistema de control PQ.

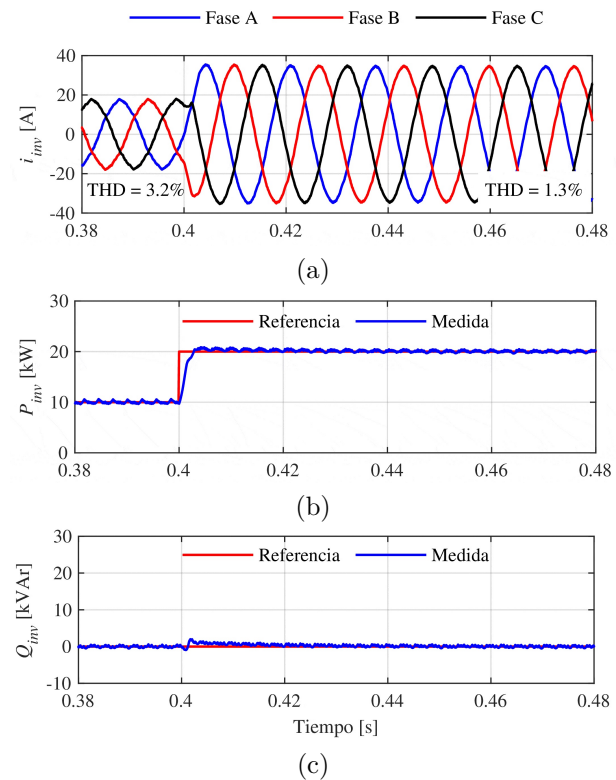


Figura 7. Variables eléctricas medidas a la salida del CEP: a) corriente; b) potencia activa y; c) potencia reactiva

Del mismo modo, en la Figura 7c se puede valorar la efectividad del control de la potencia reactiva, pues,

esta variable es mantenida prácticamente en cero en todo el intervalo simulado. Además, esto último pone en manifiesto una de las bondades que ofrece el CEP en su integración a la red: el control desacoplado de potencias P y Q .

Para el interés científico de este estudio, centrado en aquellos fenómenos que ocurren en un horizonte temporal en el orden de los milisegundos y de los pocos segundos en la dinámica operativa de un sistema eléctrico de potencia (como se justificó en la parte introductoria de este trabajo), las consignas tanto de potencia activa como de reactiva son alcanzadas de forma prácticamente instantáneas por el CEP. Esta apreciación será la premisa para el planteamiento de la modelación simplificada abordada en la siguiente subsección.

2.3. Diseño del modelo simplificado

En estudios de sistemas eléctricos de potencia en régimen dinámico, que tienen como objetivo evaluar el impacto de los agentes energéticos basados en interfaz de conexión a la red por medio de convertidores electrónicos de potencia, la utilización de un modelo detallado centrado en la arquitectura interior del CEP, como aquel presentado en la subsección anterior, puede demandar de un elevado esfuerzo computacional para la representación de sus variables internas y externas, el cual haría inviable muchos estudios en entornos de simulación en el caso de redes multimáquina y de gran dimensión. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo simplificado que emule correctamente el comportamiento dinámico de un CEP visto desde la red en el punto de conexión común (PCC), medido en términos de sus variables eléctricas. Para ello, tanto el principio de operación, los criterios de control y los resultados de simulación descritos en la sección 2.1, servirán de punto de partida para el planteamiento de la propuesta.

2.3.1. Criterios de diseño

En primer lugar, se pide considerar el diagrama de la Figura 8a. Esta ilustración es una representación sintetizada del sistema eléctrico mostrado en la Figura 2. De acuerdo con el modo de operación del CEP, este inyectará en el PCC unos valores de potencia activa y reactiva, P_{inv} y Q_{inv} , respectivamente, de acuerdo con sus valores de consigna preestablecidos. Debido a que la tensión trifásica en el PCC está impuesta por la red (en amplitud y frecuencia), el CEP tendrá que inyectar una terna de corrientes tales que permitan alcanzar las potencias de referencia P_{inv}^* y Q_{inv}^* , como se ha visto en los resultados ilustrados en la Figura 7. Por tanto, desde el punto de vista de la red en el PCC, el CEP se comporta como una fuente de corriente trifásica controlada (Figura 7a) cuya amplitud

y fase dependerá, como ya se ha mencionado, de los valores de consigna de potencia. De acuerdo con la teoría de las componentes $d - q$ (sección 2.1.2), las corrientes trifásicas inyectadas están relacionadas de forma directa con las variables P_{inv} y Q_{inv} , dada su dependencia con las componentes de corriente i_d e i_q , respectivamente (Ecuaciones 4 y 5). La Figura 8b ilustra el criterio de simplificación del modelo del CEP, al representarlo como una fuente de corriente controlada, cuyo esquema de control se desarrolla a continuación.

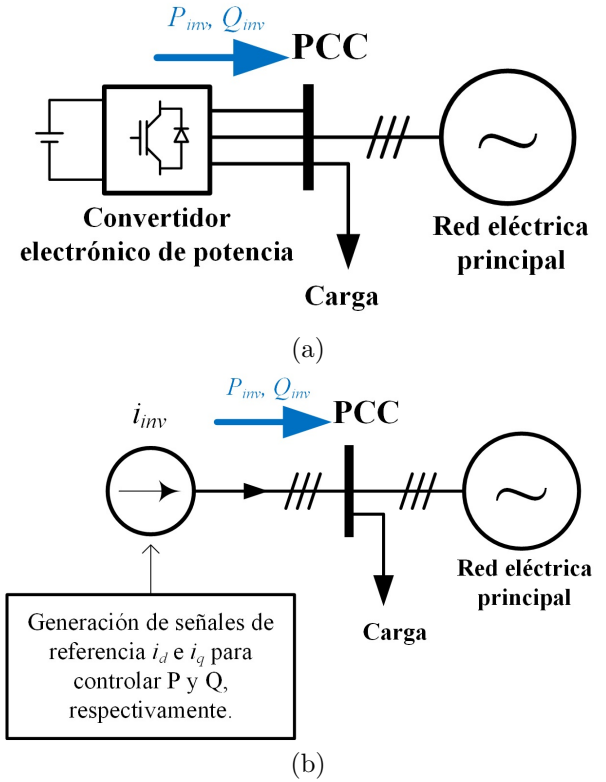


Figura 8. Criterio de simplificación del modelo del CEP: a) diagrama general; b) representación simplificada

La Figura 9 muestra la representación trifásica del diagrama de la Figura 8b, en la cual el CEP es modelado por medio de una fuente controlada de corriente. Esta fuente deberá inyectar unas corrientes trifásicas $i_{inv,A}$, $i_{inv,B}$ e $i_{inv,C}$ cuya amplitud y fase serán definidas de acuerdo con el criterio de control implementado y las aplicaciones asignadas al convertidor.

Para la generación de las señales de consigna de corriente, en este trabajo se propone la utilización del esquema de control mostrado en la Figura 10. En este, las señales trifásicas aplicadas a la fuente controlada de corriente son generadas por medio de la aplicación de la teoría del sistema coordenado $d - q$, como se explica a continuación:

- Para el control de la potencia activa, P_{inv}^* , se emplea un controlador en lazo cerrado PI, tal que

genere en su salida una señal denominada i_d^* que será la encargada de su regulación (Ecuación 4). Esta señal es aplicada a una función de retardo de primer orden, introducida para representar el tiempo que le toma al convertidor alcanzar en sus terminales el valor de la variable de control, i_d , desde que esta es especificada en su entrada, i_d^* .

- Se propone un esquema de control similar para la regulación de la potencia reactiva, Q_{inv}^* , cuya regulación se efectúa de forma análoga a la del esquema descrito anteriormente, pero, en este caso, manipulando la variable i_q (Ecuación 5).

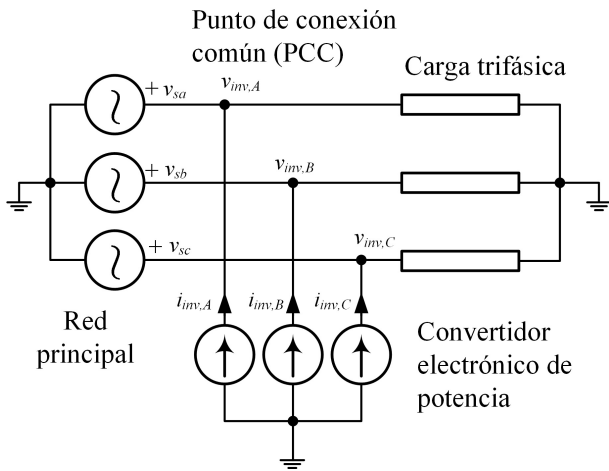


Figura 9. Propuesta de simplificación del CEP

Una vez generadas las señales i_d e i_q , estas tienen que ser transformadas a un marco referencial trifásico abc antes de ser aplicadas a la fuente controlada que representa la dinámica del CEP. Para llevar a cabo esta transformación, la fase de la tensión en el PCC es medida en tiempo real por medio de un lazo cerrado de fase (PLL, por sus siglas en inglés) para luego proceder a evaluar la transformada de Park por medio de (1). Finalmente, para retroalimentar a los controladores PI de cada uno de los lazos de control, se miden las potencias instantáneas activa y reactiva inyectadas por las fuentes controladas de corriente en el PCC.

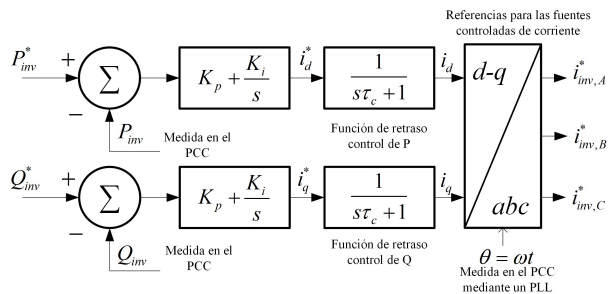


Figura 10. Propuesta de simplificación del controlador PQ

2.3.2. Implementación de la propuesta en MATLAB/Simulink®

La Figura 11 muestra la implementación del modelo simplificado del CEP en el simulador sobre el mismo banco de pruebas empleado en la sección 2.1.3. Es de destacar la notoria simplificación en cuanto a la complejidad y número de elementos necesarios para representar la integración del CEP en la red, en comparación con el modelo de la Figura 5. Para facilitar la reproducción de los resultados de la simulación aquí expuestos, se pide al lector revisar los valores asignados a los distintos parámetros del modelo en el Apéndice.

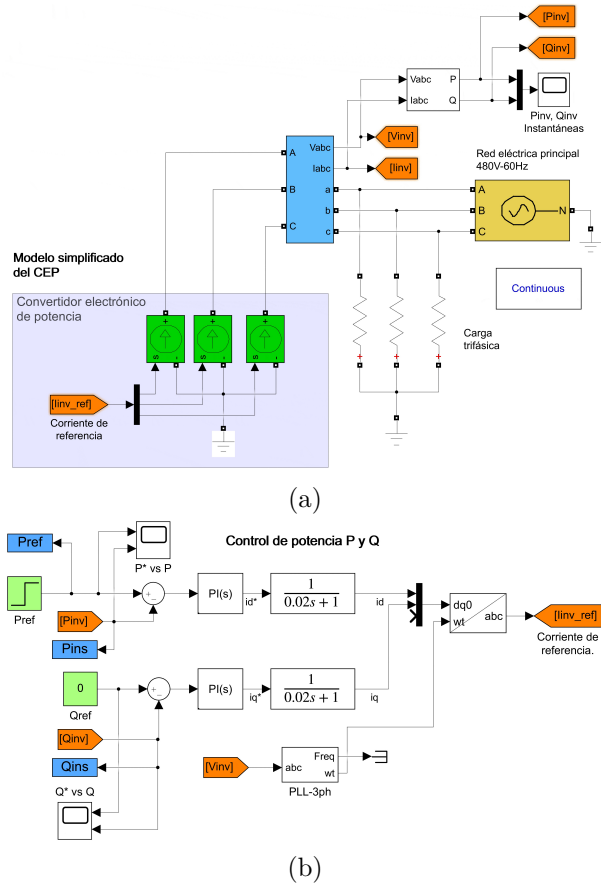


Figura 11. Esquema de implementación del modelo simplificado: a) sistema eléctrico de pruebas; b) controlador PQ

A continuación, se somete al modelo propuesto a operar bajo las mismas condiciones operativas definidas para simular el modelo detallado: señales de consigna de potencia activa y reactiva, horizonte de tiempo de la simulación, red eléctrica principal, carga alimentada, etc. Los resultados ilustrados en la Figura 12a revelan que la corriente trifásica inyectada por el CEP es generada correctamente y que su amplitud y forma es muy aproximada a aquella obtenida al simular el modelo detallado (Figura 7a).

Las Figuras 12b y 12c muestran las potencias instantáneas activas y reactivas medidas en bornes del convertidor. En estas se observa que los respectivos valores de consigna son alcanzados exitosamente y de una forma más rápida que el modelo detallado. Debido a que el modelo simplificado propuesto se acerca más a las condiciones ideales de funcionamiento de un convertidor electrónico de potencia, las corrientes trifásicas carecen prácticamente de contenido armónico y, además, las potencias instantáneas alcanzan su valor objetivo de forma mucho más inmediata.

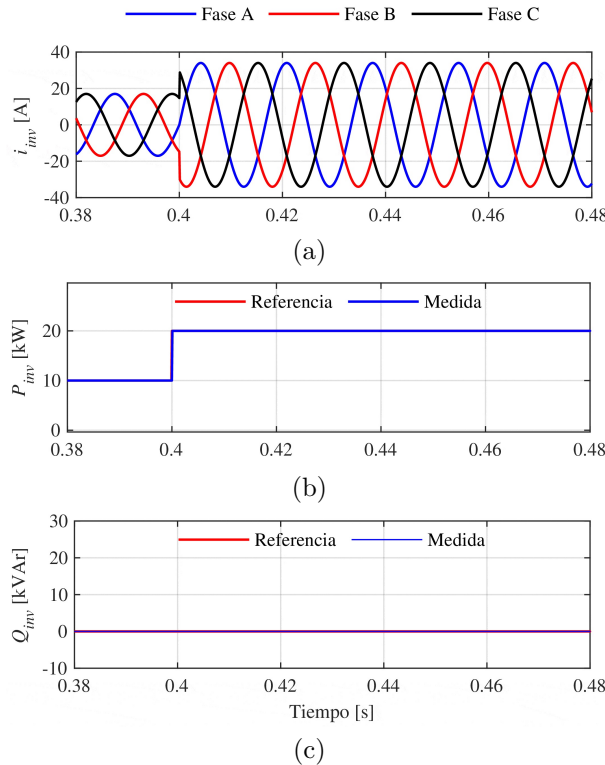


Figura 12. Variables eléctricas medidas a la salida del modelo simplificado del convertidor: a) corriente; b) potencia activa y; c) potencia reactiva

3. Resultados y discusión

En esta sección se presenta un análisis comparativo del rendimiento del modelo simplificado propuesto (Figura 11) respecto al modelo detallado tomado como referencia (Figura 5). Para el efecto, a ambos modelos se

aplican las señales de consigna de potencia mostradas en la Figura 13 y se los somete a las mismas condiciones operativas en el banco de pruebas diseñado en MATLAB/Simulink®.

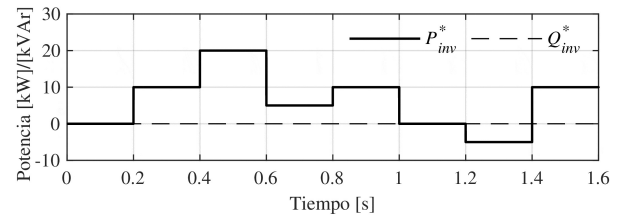


Figura 13. Perfil de las potencias de consigna aplicadas al convertidor

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos en la simulación. En esta se observa el correcto desempeño de los dos modelos en el seguimiento de los valores de potencia de consigna asignados. Esta es una conclusión importante, pues estas variables son el resultado de cuantificar la tensión y la corriente trifásicas en los bornes del CEP y son aquellas que más interesan en el estudio dinámico de sistemas eléctricos de potencia. La corriente trifásica conseguida por el modelo propuesto tiene prácticamente la misma envolvente de aquella corriente generada por el modelo detallado. La similitud presentada por la dinámica de las variables de interés de los dos modelos, en el pequeño horizonte temporal graficado, permiten verificar la versatilidad del modelo propuesto y que la simplificación en la representación de los principales componentes de un CEP no penaliza de forma importante su exactitud numérica. Nótese que, la dinámica resultante corresponde al comportamiento ideal de un convertidor: transiciones de potencia mucho más inmediatas, ausencia de rizado en las potencias inyectadas y carencia de contenido armónico en la señal de corriente. Cuanto mayor sea el horizonte temporal contemplado en el estudio de red desarrollado con el modelo propuesto, menor será el impacto de estas limitaciones sobre los resultados numéricos generados.

Finalmente, en cuanto a los réditos computacionales obtenidos con la implementación de la propuesta, la simulación del modelo simplificado arroja sus resultados numéricos en un 4 % del total del tiempo de cómputo que le toma al modelo detallado para converger.

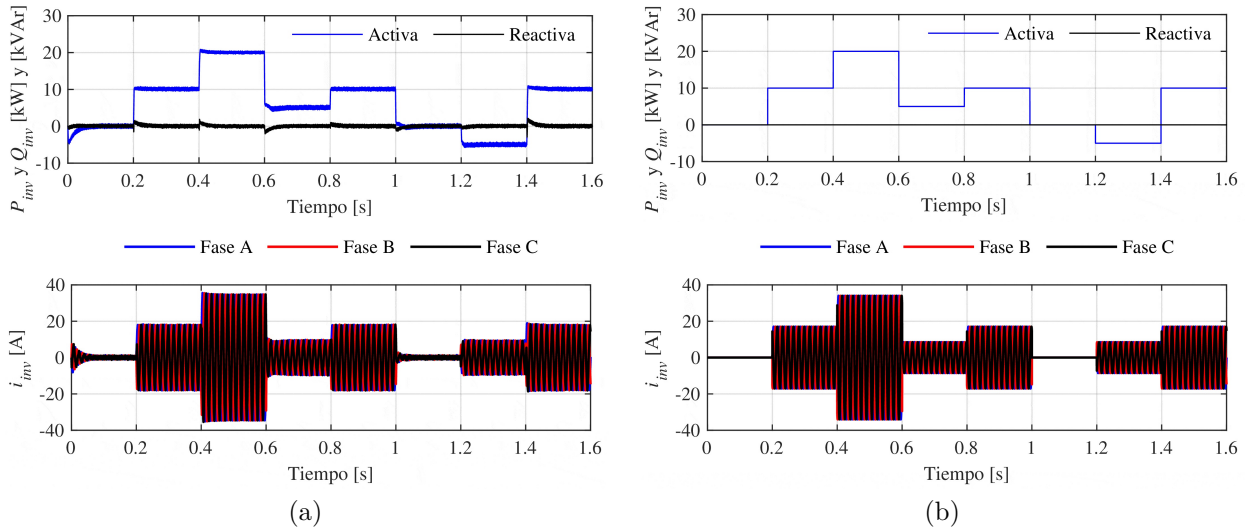


Figura 14. Resultados de la simulación: a) modelo detallado; b) modelo simplificado

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un modelo simplificado de una interfaz de conexión a la red basada en convertidor electrónico de potencia para estudios de red en régimen dinámico. Para el efecto, en primera instancia, se ha realizado una revisión exhaustiva del principio de operación de un convertidor electrónico de potencia y de su implementación en MATLAB/Simulink®. Luego, de acuerdo con la base teórica expuesta y al analizar los resultados preliminares de la simulación, se procedió a desarrollar un modelo simplificado del convertidor tal que permita emular un comportamiento dinámico similar al que se obtendría al simular un modelo detallado.

Los esfuerzos invertidos en las labores de simplificación y de diseño quedan justificados luego de realizar un análisis comparativo de las dinámicas generadas por los dos modelos al estar sometidos a las mismas condiciones operativas en el entorno de simulación. Los resultados numéricos y las dinámicas adoptadas por ciertas variables de interés son muy aproximados entre sí, consiguiéndose, además, una reducción del tiempo de cómputo numérico en el orden del 96 %. Estos hitos permiten cumplimentar los objetivos principales de este trabajo de investigación.

Es preciso indicar que el modelo propuesto arroja resultados numéricos que son más próximos al comportamiento ideal de un convertidor electrónico de potencia, por tanto, queda abierta la posibilidad de incorporar ciertas mejoras en investigaciones futuras, tales como:

- Agregar cierto contenido armónico a la señal de corriente trifásica inyectada en función de su amplitud.

- Realizar un proceso más exhaustivo de sintonización de las ganancias proporcional-integral del controlador PQ.
- Ejecutar técnicas de modelación, como por ejemplo, «hardware-in-the-loop», para conseguir una caracterización más realista de la función de retraso asignada a los lazos del controlador de potencia activa y reactiva, entre otras.

Apéndice

A. Parámetros red eléctrica:

Fuente trifásica: $V_{ab(rms)} = 480$ V, $f = 60$ Hz
Carga trifásica: $P_{LA} = P_{LB} = P_{LC} = 1,00$ kW.

B. Parámetros modelo detallado:

Modulación SVPWM: $f_{carrier} = 20$ kHz
Controlador PI: $K_P = 50$ y $K_I = 2500$
Filtro R-L-serie: $R_f = 0,1$ Ω y $L_f = 12,7$ mH
Tensión en CC: $U_d = 800$ V

C. Parámetros modelo simplificado:

Controlador de P: $K_p = 5$ y $K_i = 50$
Controlador de Q: $K_p = -5$ y $K_i = -50$
Cte. tiempo función de retraso: $\tau_C = 0,02$ s

D. Parámetros simulador

	Modelo detallado	Modelo simplificado
Solver	ode3 (Bogacki-Shampine)	ode23tb (stiff/TR-BDF2)
Tamaño de paso cálculo numérico	5×10^{-6} s (fijo)	$0,5 \times 10^{-3}$ s (máx. variable)

Referencias

- [1] I. Alotaibi, M. A. Abido, M. Khalid, and A. V. Savkin, "A comprehensive review of recent advances in smart grids: A sustainable future with renewable energy resources," *Energies*, vol. 13, no. 23, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13236269>
- [2] T. Sadamoto, A. Chakraborty, T. Ishizaki, and J.-i. Imura, "Dynamic modeling, stability, and control of power systems with distributed energy resources: Handling faults using two control methods in tandem," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 39, no. 2, pp. 34–65, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCS.2018.2888680>
- [3] J. Baran and A. Jaderko, "An MPPT control of a PMSG-based WECS with disturbance compensation and wind speed estimation," *Energies*, vol. 13, no. 23, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13236344>
- [4] C. González-Castaño, L. L. Lorente-Leyva, J. Muñoz, C. Restrepo, and D. H. Peluffo-Ordóñez, "An MPPT strategy based on a surface-based polynomial fitting for solar photovoltaic systems using real-time hardware," *Electronics*, vol. 10, no. 2, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics10020206>
- [5] O. Saadeh, A. Al Nawasrah, and Z. Dalala, "A bidirectional electrical vehicle charger and grid interface for grid voltage dip mitigation," *Energies*, vol. 13, no. 15, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13153784>
- [6] A. R. Choudhury, S. Pati, A. Choudhury, and K. B. Mohanty, "Control of voltage frequency of a hybrid microgrid using a FLC based bidirectional converter equipped with BESS," in *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376666>
- [7] D. Li, F. Li, D. Rong, K. Zheng, D. Wang, and Q. Li, "An svpwm strategy for multifunction current source converter," in *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590656>
- [8] A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, and A. Molina-García, "Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, p. 109369, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
- [9] N. Bouzounierakis, Y. Katsigiannis, K. Fiorentzis, and E. Karapidakis, "Effect of hybrid power station installation in the operation of insular power systems," *Inventions*, vol. 4, no. 3, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/inventions4030038>
- [10] J. I. Sarasúa, G. Martínez-Lucas, C. A. Platero, and J. A. Sánchez-Fernández, "Dual frequency regulation in pumping mode in a wind-hydro isolated system," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11112865>
- [11] D. Ochoa and S. Martínez, "Proposals for enhancing frequency control in weak and isolated power systems: Application to the wind-diesel power system of San Cristobal island-Ecuador," *Energies*, vol. 11, no. 4, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11040910>
- [12] A. Kocalmis and S. Sunter, "Simulation of a space vector pwm controller for a three-level voltage-fed inverter motor drive," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006, pp. 1915–1920. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347442>
- [13] S. Huang, D. C. Pham, K. Huang, and S. Cheng, "Space vector PWM techniques for current and voltage source converters: A short review," in *2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fqdEdU>
- [14] M. Siami, D. A. Khaburi, M. Rivera, and J. Rodríguez, "A computationally efficient lookup table based FCS-MPC for PMSM drives fed by matrix converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 7645–7654, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2694392>
- [15] M. Siami, D. Arab Khaburi, and J. Rodríguez, "Simplified finite control set-model predictive control for matrix converter-fed PMSM drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 2438–2446, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2696902>
- [16] T.-L. Nguyen, H.-N. Nguyen, T. D. Nguyen, and H.-H. Lee, "Simplified model predictive control for AC/DC matrix converters with fixed switching frequency," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797210>

- [17] J. Lei, S. Feng, P. Wheeler, B. Zhou, and J. Zhao, "Steady-state error suppression and simplified implementation of direct source current control for matrix converter with model predictive control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 3183–3194, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2928874>
- [18] M. M. Bhesaniya and A. Shukla, "Computationally efficient method for simulating current source modular multilevel converter," in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, 2016, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695490>
- [19] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3vqDKD4>
- [20] A. Moeed Amjad and Z. Salam, "A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 141–153, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.080>
- [21] K. Latha Shenoy, C. G. Nayak, and R. P. Mandi, "MPPT enabled SPWM based bipolar VSI design in photovoltaic applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, Part 1, pp. 1372–1378, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.223>
- [22] A. Arif, Y. Bekakra, D. B. Attous, and H. Bakini, "Comparative study between indirect power control and sliding mode control with SVPWM for DFIG driven by wind turbine," in *2020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP)*, 2020, pp. 322–327. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151770>
- [23] R. Palanisamy, P. Aravindh, and K. Vijayakumar, "Experimental and numerical analysis on SVPWM based grid connected photovoltaic system," *Materials Today: Proceedings*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.382>
- [24] M. A. A. Badran, A. M. Tahir, and W. F. Faris, "Digital implementation of space vector pulse width modulation technique using 8-bit microcontroller," *World Applied Sciences Journal*, no. 21, pp. 21–28, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/2RPZF87>
- [25] L. Fan, *Control and Dynamics in Power Systems and Microgrids*. CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yDXpBt>
- [26] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fQU7SP>



INFLUENCIA DEL HOMOGENEIZADO PREVIO AL LAMINADO EN FRÍO EN LA MICROESTRUCTURA DEL AA3003

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION PRECEDING TO COLD-ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE OF THE AA-3003

Gennifer Aparicio-Carrillo¹ , Marco Ciaccia-Sortino^{2,*} , Ricardo Jerez G³

Recibido: 09-06-2020, Recibido tras revisión: 09-04-2021, Aceptado: 11-05-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

La aleación de aluminio AA3003 proveniente de colada continua posee una microestructura que afecta significativamente su uso potencial en aplicaciones de ingeniería. Este trabajo estudia los efectos de la homogeneización sobre la microestructura del AA3003 con trabajo en frío. Se estudiaron seis condiciones combinando las variables: condición inicial (con y sin homogeneizado) y cantidad de trabajo en frío. Se evaluaron todas las condiciones mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, combinadas con técnicas de electrones retrodispersados y espectroscopía de dispersión de rayos X. Los resultados sugieren que, para ambas condiciones iniciales, las fases secundarias presentes son $Al_6(Mn,Fe)$ y $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$. La homogeneización causó la disolución y precipitación de los dispersoides, la esferoidización de las partículas primarias y permitió que la variación del tamaño de las partículas secundarias fuese mínima durante el trabajo en frío. Además, se obtuvo que las fases secundarias están compuestas de partículas primarias y secundarias, que difieren en su contenido de Fe y Mn, lo que resulta en una relación Mn/Fe más baja para las partículas primarias (0,57 para la condición recibida y 0,80 para la condición homogeneizada), mientras que los dispersoides tienen una mayor relación Mn/Fe (1,56 después de la homogeneización). La homogeneización aumentó la ductilidad y redujo la probabilidad de agrietamiento del material durante el trabajo en frío, lo cual se evidenció en los resultados obtenidos de resistencia, dureza y ductilidad.

Palabras clave: microestructura, AA3003, homogeneizado, trabajo en frío, colada continua

Abstract

The aluminum alloy AA3003 produced by a direct chill continuous casting process has a microstructure that significantly affects its potential use in engineering applications. This work studies the effects of the homogenizing heat treatment on the microstructure of AA3003 with cold working. Six conditions were studied, combining the variables initial condition (with and without homogenizing) and amount of cold working. All conditions were evaluated by means of optical and scanning electron microscopy, in combination with backscattered electrons and energy dispersive X ray spectroscopy techniques. Results suggest that for both initial conditions, the secondary phases present are $Al_6(Mn,Fe)$ and $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$, which vary in number, size, and shape. The homogenization caused the dissolution and precipitation of dispersoids, in addition to the spheroidization of primary particles, and minor variation of the size of secondary particles during cold working. Secondary phases are composed of primary and secondary particles, which differ in their Fe and Mn content, resulting in a lower Mn/Fe ratio for the primary particles (0,57 for the as-received condition and 0,80 for the homogenized condition), whereas the dispersoids have a higher Mn/Fe ratio (1,56 after the homogenization). Homogenization increased ductility and reduced the likelihood of cracking during cold working. This was evidenced by the results obtained for strength, hardness, and ductility.

Keywords: Microstructure, AA-3003, homogenized, cold work, continuous casting

^{1,*}Centro de Investigaciones en Mecánica, Universidad de Carabobo -Venezuela.

²Ingeniería Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ecuador

Autor para correspondencia ✉: mciaaccia@utn.edu.ec.

³Universidad de Carabobo, Escuela de Ingeniería Mecánica, Venezuela.

1. Introducción

La aleación de aluminio AA3003 es utilizada en la industria de fabricación de carrocerías de vehículos de transporte y en el envasado de alimentos y bebidas, entre otras aplicaciones; es producido por procesos de colada continua o semicontinua.

En el proceso de colada continua por enfriamiento directo (DC, *direct chill* en inglés), un canal transportador lleva el metal fundido a un molino de laminación, al final del cual hay una boquilla que distribuye el metal en todo el ancho de los rodillos. Un sistema de enfriamiento con agua mantiene los rodillos a una temperatura más baja que la del metal fundido, causando la solidificación del material en contacto con el rodillo, con altas tasas de enfriamiento. Por lo tanto, la matriz de aluminio llega a estar altamente saturada con manganeso y muestra una variación de su microestructura con respecto al espesor, debido a que los gradientes de temperatura producen un enfriamiento más rápido en las superficies de la lámina que en el medio del espesor [1].

Después de la solidificación, la microestructura se caracteriza por ser una solución heterogénea con partículas primarias de $Al_6(Mn,Fe)$ y cantidades más pequeñas de $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ que se forman en los bordes de la celda de solidificación o en las áreas interdendríticas. Esta microestructura afecta significativamente las propiedades mecánicas de la aleación y su uso potencial en aplicaciones de ingeniería [2].

Para reducir este efecto, se aplica un tratamiento térmico de homogeneizado a temperaturas entre 500 °C y 650 °C, por un mínimo de 8 h [3, 4]. Este proceso reduce la concentración de manganeso y controla el tamaño, la densidad, y la distribución de las partículas primarias y dispersoides, que son algunos de los factores que afectan el fenómeno de recristalización, la textura, y las propiedades mecánicas de la aleación en las etapas de formación [5, 6].

Este trabajo presenta un estudio comparativo de la microestructura de la aleación de aluminio AA3003 producida por colada continua con y sin homogeneización, con la posterior aplicación de trabajo en frío (CW, *cold working* en inglés) por laminación, utilizando microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido en combinación con técnicas de electrones retrodispersados y espectroscopía de dispersión de rayos X, y la evaluación de sus propiedades mecánicas (microdureza y resistencia). Los resultados obtenidos permitirán la comparación de la forma y distribución de las partículas primarias y secundarias (dispersoides) presentes en la aleación tanto en condiciones iniciales como luego de la aplicación del trabajo en frío, para evaluar la relevancia, desde el punto de vista microestructural, de la homogeneización para el posterior conformado en frío de la aleación.

2. Materiales y métodos

2.1. Experimentación

Se utilizó una lámina de aleación AA3003, con un ancho de 1350 mm, una longitud de 250 mm (en la dirección de laminado) y un espesor promedio de 6,2 mm, proveniente del proceso de colada continua de doble rodillo de CVG ALUCASA (Venezuela). La composición química, obtenida por espectroscopia de emisión óptica, fue (% en peso): Mn 1,170, Fe 0,666, Si 0,357, Cu 0,133, Zn 0,012 y Al 97,600.

Se cortaron seis muestras de la lámina. Tres cortes, etiquetados como muestras H, fueron sometidos a tratamiento térmico de homogeneizado en un horno de resistencia eléctrica, a 600 °C por 8 h como se sugiere en [7], y luego enfriados lentamente, mientras que los tres restantes, denominados muestras DC, fueron dejados en la misma condición en que fueron recibidos. Una muestra H y una muestra DC fueron reservadas para referencia y etiquetadas como muestra en condición inicial (CI) (0 % de trabajo en frío). Una muestra DC y una muestra H fueron laminadas en frío con una reducción de 30 % en su espesor, y las muestras restantes fueron sometidas a una reducción de 60 %. El proceso de trabajo en frío fue realizado en un tren de laminado experimental a una velocidad de 1,5 m/min, manteniendo la dirección original de laminado de la lámina y haciendo varias pasadas. Posteriormente, se cortaron las muestras para la preparación de los especímenes de prueba de tracción y se hicieron otros cortes para la evaluación microestructural.

Los especímenes para los ensayos de tracción fueron preparados tal como se especifica en la norma ASTM E8 [8], con una sección transversal rectangular, una longitud calibrada de 25 mm y una longitud total de 100 mm. Dichos especímenes fueron cortados con un chorro de agua para evitar daños microestructurales en la zona de corte.

Finalmente, las muestras para la evaluación microestructural fueron embutidas en polimetilmetacrilato para facilitar su manejo y preparación, así como también para evitar la posible contaminación de la superficie. Estas muestras fueron preparadas de acuerdo con las normas ASTM E3 [9] y ASTM E407 [10], y desbastadas en agua con papel de lija N.º 240, 320, 400, 600 y 800. Posteriormente, fueron pulidas en dos etapas: primero con alúmina de 1 μm y luego en una máquina de pulido electrolítico Buehler Electromet 4 con un electrolito compuesto de 800 cm³ de etanol, 140 cm³ de agua destilada y 60 cm³ de ácido perclórico al 60 %, aplicando una tensión de 17 V por 25 segundos. Finalmente, las muestras fueron atacadas por inmersión en una solución compuesta de 50 cm³ de agua destilada y 5 g de NaOH a 70 °C por 10 segundos.

2.1.1. Microscopía óptica (MO)

En cada caracterización microestructural de materiales es necesaria una exploración preliminar por microscopía óptica, ya que esta proporciona una idea general de la microestructura, distribución y morfología de las fases, y otras características de interés en las cuales enfocarse con las técnicas de microscopía electrónica.

Las muestras fueron analizadas con un microscopio Olympus PMG3 con magnificaciones de 100X a 1000X, y las imágenes fueron tomadas con una cámara Olympus DP12.

En este estudio, la variación esperada de la microestructura debida a los gradientes de deformación fue evaluada en tres puntos de la sección transversal de las muestras. Estas posiciones se designan como «exterior», «medio» y «centro», como se muestra en la Figura 1.

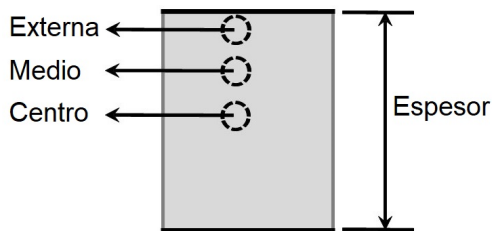


Figura 1. Posiciones para evaluar la variación de la sección transversal de la microestructura de la muestra

2.1.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM, *scanning electron microscopy* en inglés)

Esta técnica de visualización fue utilizada para localizar en la microestructura fases y precipitados que serán identificados posteriormente. Se seleccionó esta técnica porque es capaz de realizar una mayor magnificación de la imagen (más de 1000X) en comparación con la microscopía óptica.

La superficie de la muestra fue cubierta con polvo de oro, dado que es un material altamente conductor, permitiendo el barrido electrónico de toda la superficie de la muestra y la obtención de imágenes con una resolución mejorada.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6390 en la configuración de electrones retrodispersados (BSE, *backscattered electron* en inglés), una técnica que resalta el contraste entre las fases, haciéndolas más claras o más oscuras dependiendo del peso atómico de sus componentes. En este método, la energía específica del rayo depende del número atómico del material, esto es, a mayor número atómico promedio, mayor intensidad. La visualización fue realizada de acuerdo con el patrón mostrado en la Figura 1.

2.1.3. Análisis mediante espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX, *Energy dispersive X-ray spectroscopy* en inglés)

Con esta técnica es posible realizar un análisis químico semicuantitativo de puntos o líneas específicas en el área seleccionada de la muestra. Esta técnica da valores de la cantidad relativa de los elementos constituyentes expresada como porcentaje en peso y como peso atómico, y por tanto permite la identificación provisional de la fase observada. Este análisis fue realizado con un dispositivo EDX 7582 de Oxford Instruments.

2.1.4. Evaluación de las fases en la aleación AA3003

Se realizó una evaluación tentativa de las fases con los resultados obtenidos de los estudios de SEM utilizando un detector BSE, y los análisis EDX, juntamente con las investigaciones [6, 7], [11, 12]. Estos autores fueron capaces de identificar, utilizando TEM, dos tipos de fases, tanto en las muestras dejadas en la misma condición en que fueron recibidas como en las homogeneizadas:

- La fase primaria formada por la matriz dendrítica de aluminio.
- Las fases secundarias $Al_6(Mn,Fe)$ y $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$, pueden formar parte de las partículas primarias provenientes de la solidificación del líquido con alto contenido de elementos de aleación y de las partículas secundarias (dispersoides, con tamaño menor a $1\ \mu m$), que se originan de la descomposición y precipitación de los elementos de aleación en solución sólida sobresaturada en la matriz dendrítica.

2.1.5. Evaluación de las propiedades mecánicas

Los ensayos de tracción fueron realizados a una tasa de desplazamiento de 5 mm/min utilizando un equipo universal de ensayo de materiales MTS de 25 toneladas de capacidad y un extensómetro Instron de 1 pulgada. Se realizaron cinco réplicas para cada condición de prueba, considerando las direcciones longitudinal, transversal y diagonal con respecto a la dirección de laminado, evaluando un total de 90 especímenes.

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers en las muestras utilizadas en microscopía óptica, aplicando tres penetraciones para cada condición de estudio, de acuerdo con el estándar ASTM E384 [13], con una carga de 50 g y 15 segundos de aplicación. Se utilizó un microdurómetro Buehler Identamet 1104 Vickers – Knoop.

3. Resultados y discusión

3.1. Microscopía óptica

Esta técnica fue utilizada para identificar puntos de interés, así como el arreglo y la morfología preliminar de los precipitados. Por esta razón, solo se presentan los resultados para las muestras CI. En la Figura 2 se ve el barrido de la microestructura de la aleación AA3003 en las posiciones exterior, media y centro del espesor, en la condición inicial DC.

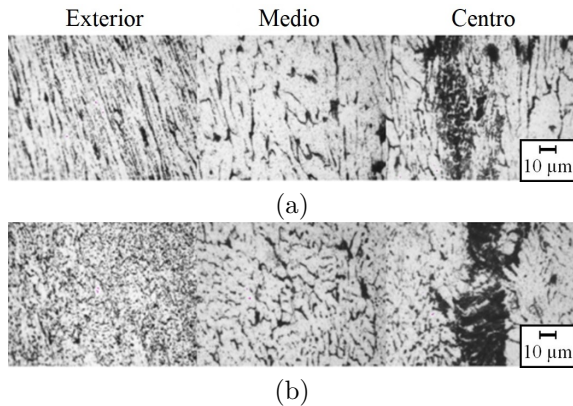


Figura 2. Micrografías OM mostrando la microestructura de las muestras DC CI de la aleación AA3003: (a) dirección de laminado, (b) dirección transversal

Puede observarse en la Figura 2(a) que los precipitados en el área exterior se estiran en la dirección de laminado. En contraste, en la Figura 2(b) se presentan como puntos, lo cual es consistente con el estirado de los precipitados en la dirección normal al plano de la micrografía.

Una característica del proceso de colada continua DC es el gradiente de temperatura a través del espesor de la lámina, causando diferentes tasas de enfriamiento y solidificación y produciendo un cambio en la microestructura, ver Figuras 2(a) y (b). Puede observarse que los precipitados son más finos y están presentes en mayores cantidades en las áreas exteriores de las muestras, mientras que en la zona media los precipitados son más grandes y con menor densidad. Se observó una línea de segregación central (LSC) hacia el área central de las muestras, la cual consiste de una alta concentración de precipitados alineados en la dirección de laminado. Este defecto, característico de las aleaciones de aluminio obtenidas por colada continua DC, ha sido observado por otros investigadores [14,15].

Un resultado esperado de la homogeneización es la distribución uniforme de las partículas de la segunda fase y la ausencia de la LSC. Sin embargo, a pesar de que la Figura 3 evidencia que la concentración de los precipitados en la LSC se ha reducido, la distribución de los precipitados a través del espesor es similar a la de la condición inicial DC, ver Figura 2. Estos hechos

llevan a la conclusión que es necesario optimizar los parámetros del tratamiento térmico de homogeneización.

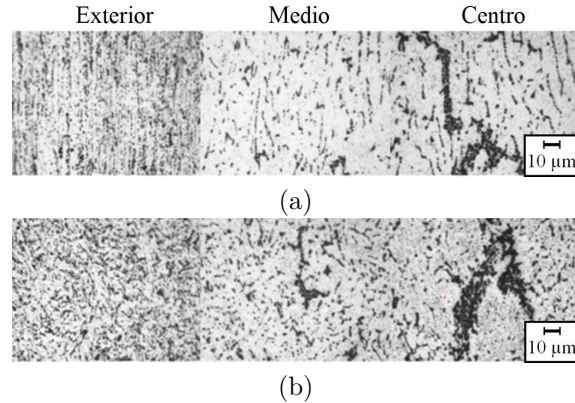


Figura 3. Micrografías OM mostrando la microestructura de las muestras H CI de la aleación AA3003: (a) dirección de laminado, (b) dirección transversal

Un efecto adicional de la homogeneización es un cambio en la morfología de los precipitados. La micrografía de la Figura 4(a) correspondiente al espécimen CI que se mantiene en la condición en que fue recibido, muestra que los precipitados se estiraron en la dirección de laminado, mientras que la Figura 4(b) expone claramente la esferoidización de los precipitados en el espécimen CI homogeneizado.

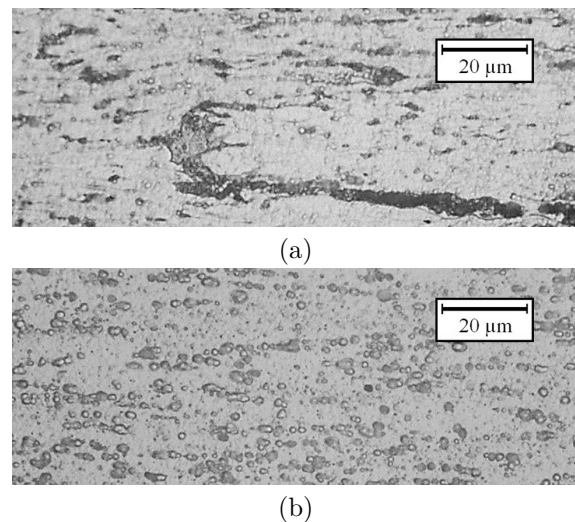


Figura 4. Micrografías OM mostrando el efecto de la homogeneización en la morfología de los precipitados en las muestras CI de la aleación AA3003: (a) precipitados alargados en el espécimen DC, (b) precipitados esferoidizados en el espécimen H

3.2. Evaluación de las fases por SEM

La evaluación de las fases de los especímenes CI fue realizada utilizando SEM con la técnica BSE. Las regiones más claras en las imágenes indican la posible

presencia de la fase α -Al(Mn,Fe)Si debido a su número atómico promedio más alto (rico en Mn, Fe y Si), mientras que la fase Al_6 (Mn,Fe) tiene una cantidad más pequeña de Mn y Fe y, por tanto, un número atómico más bajo y menor brillo que la fase α . La matriz es la fase más opaca, ya que tiene la concentración más baja de elementos de aleación.

La Figura 5 y la Tabla 1 exponen la microestructura de la aleación en la condición como fue recibida. De acuerdo con [16], las partículas constituyentes Al_6 (Mn,Fe) y α -Al(Mn,Fe)Si se forman principalmente como redes interdendríticas eutécticas.

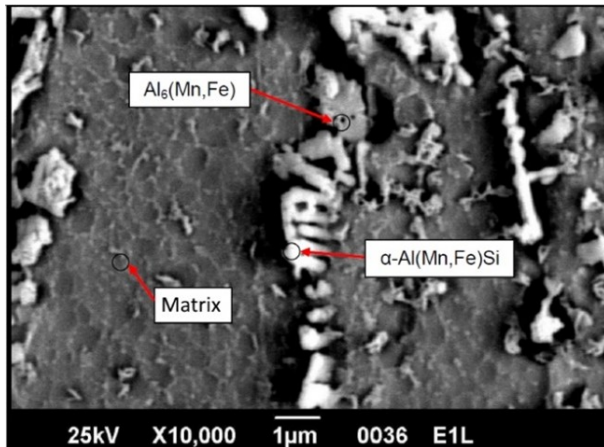


Figura 5. Micrografía SEM mostrando una identificación tentativa de las fases de la aleación AA-3003 en la condición como fue recibida

Tabla 1. Microanálisis químico BSE de la aleación AA3003 en la condición como fue recibida

Fases	Porcentaje en peso				Porcentaje atómico			
	Al	Mn	Fe	Si	Al	Mn	Fe	Si
Matriz	97	1,9	0,8	—	99	0,9	0,4	—
α -Al(Mn,Fe)Si	87	2,7	4,1	2	88	1,3	2	2
Al_6 (Mn,Fe)	89	3,1	5,3	—	90	1,5	2,6	—

En la Figura 5 puede verse que las dos fases coexisten en redes eutécticas, que se presume son las sugeridas por [16]. El análisis químico semicuantitativo y el análisis de espectros EDX realizado en los puntos indicados en la Figura 5 proporcionan los siguientes resultados:

- La evaluación en el área señalada como la matriz presenta menores cantidades de elementos de aleación en comparación con las otras dos, y ausencia de silicio.
- La fase marcada como Al_6 (Mn,Fe) tiene el más alto contenido de hierro de las tres zonas evaluadas, y no existe la presencia de silicio.
- La fase marcada como α -Al(Mn,Fe)Si es la única zona que tiene silicio.

Estos resultados revelan que el material en la condición DC tiene una microestructura que podría estar compuesta de partículas de Al_6 (Mn,Fe) y α -Al(Mn,Fe)Si.

La Figura 6 y la Tabla 2 presentan la microestructura del material homogeneizado. Las fases secundarias aparecen como partículas individuales, en contraste con las redes eutécticas mostradas en el material en la condición como fue recibido. Estas partículas, de un tamaño alrededor de 1 μ m, se clasifican como dispersoides.

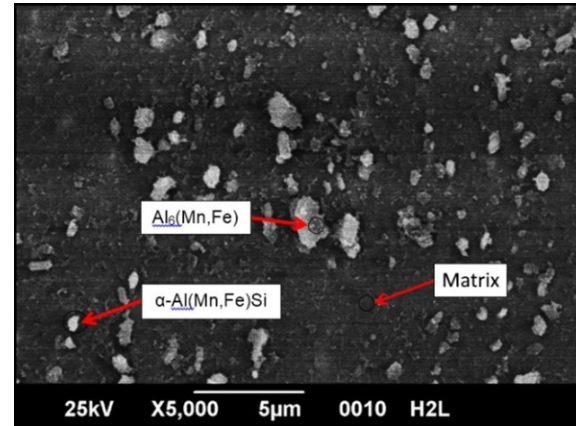


Figura 6. Micrografía SEM mostrando una identificación tentativa de las fases de la aleación AA3003 en la condición homogeneizada con 0 % de trabajo en frío

Tabla 2. Microanálisis químico BSE de la aleación AA-3003 en la condición homogeneizada con 0 % de trabajo en frío

Fases	Porcentaje en peso				Porcentaje atómico			
	Al	Mn	Fe	Si	Al	Mn	Fe	Si
Matriz	100	—	—	—	100	—	—	—
α -Al(Mn,Fe)Si	79,9	4,72	3,20	2,34	76,5	2,18	1,48	2,15
Al_6 (Mn,Fe)	86,3	3,47	3,94	—	84,2	1,66	1,88	—

A través de la evaluación SEM del material homogeneizado, fue difícil localizar partículas cuya composición química correspondiera a la fase Al_6 (Mn,Fe). Por lo tanto, puede inferirse que la mayor parte de esta fase se transformó en la fase α -Al(Mn,Fe)Si como resultado del tratamiento térmico, como se sugiere en [6] y [11]. Este efecto aumenta la ductilidad de la aleación, mejorando su desempeño en procesos de conformado de plástico [6], [11].

Los resultados obtenidos del análisis químico y los espectros EDX, presentados en la Figura 6, muestran que, al igual que en el caso del material como fue recibido, la fase oscura contiene la cantidad más alta de hierro, y solo la fase brillante contiene silicio. Sin embargo, puede notarse que la matriz está compuesta de 100 % aluminio, lo cual evidencia una disminución de los elementos de aleación en la solución sólida sobresaturada como consecuencia de la aplicación del

tratamiento térmico. Por lo tanto, la aleación alcanza un estado de equilibrio a través de la precipitación de manganeso y hierro.

3.3. Estructura y composición de las fases

Durante el calentamiento hasta la temperatura de homogeneización, los dispersoides precipitan en la matriz; posteriormente, la mayoría de las partículas primarias compuestas por la fase $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ se transforman a la fase $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ debido a la alta difusión del silicio contenido en las soluciones sólida y eutéctica [16–18]. Dado que la transferencia de átomos de silicio no ocurre de un constituyente al otro (desde las partículas primarias a los dispersoides o viceversa), ni intersticialmente ni por sustitución, estos investigadores han propuesto estudiar la evolución de las partículas primarias y dispersoides a través de la relación de los porcentajes atómicos de Mn y Fe, obtenido por los espectros EDX.

Li y Arnberg [19] encontraron que esta relación varía de acuerdo con la temperatura y tiempo de homogeneización, debido a que los átomos de hierro y manganeso se sustituyen mutuamente en las partículas primarias y dispersoides. Sobre la base de esta metodología, los análisis químicos EDX y semicuantitativo fueron realizados a partículas primarias y dispersoides ubicadas en las posiciones centro y media (ver Figura 1) de ambas muestras en condición inicial. Las Figuras 7 y 8 ofrecen ejemplos de los espectros EDX obtenidos, y la Tabla 3 presenta la composición de elementos químicos y la relación Mn/Fe promedio.

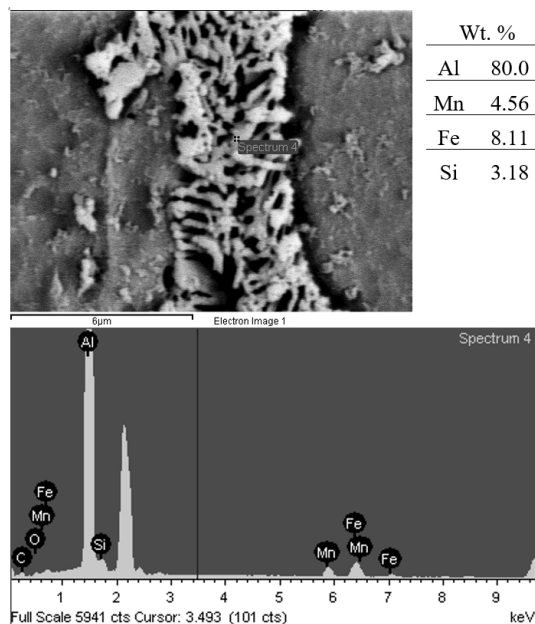


Figura 7. Micrografía SEM y espectro EDX de una partícula primaria en la condición como fue recibida

Estos resultados son similares a los encontrados por [15], quienes obtuvieron relaciones Mn/Fe, para

las partículas primarias, de 0,57 en la condición DC, y 0,79 para el material homogeneizado; en el caso de los dispersoides, se encontró un valor de 1,70.

Tabla 3. Composición de elementos químicos obtenida por EDX de las partículas primarias y dispersoides de la aleación AA3003 en las condiciones iniciales DC y H

Partículas	Condición inicial	Porcentaje en peso				Relación Mn/Fe promedio
		Al	Mn	Fe	Si	
Primarias	DC	80	4,6	8,1	3,2	0,57
		82	4,9	8,6	4,5	
	H	77	5,2	6,6	4,1	0,8
Dispersoides	H	84	5,1	6,3	4,1	
		77	6	4	3,1	1,56
		79	5,7	3,6	3,8	

Nota: Dos muestras por condición

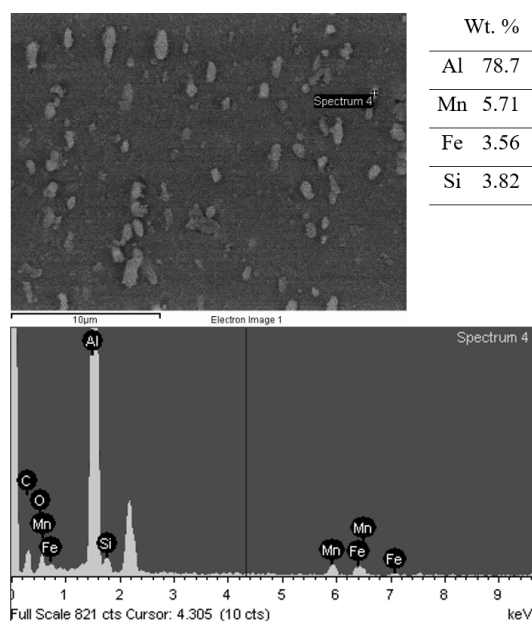


Figura 8. Micrografía SEM y espectro EDX de una partícula dispersoide en la condición homogeneizada

En función de la similitud entre los resultados obtenidos en este trabajo y los encontrados en la literatura, se presume que existen dos tipos de fase $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ en la condición homogeneizada:

- La fase α primaria, que proviene de la transformación de $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ y de la ruptura de las redes eutécticas durante el calentamiento, la cual, al igual que las partículas primarias en la condición DC, tiene un alto contenido de hierro.
- La fase α secundaria, proveniente de la precipitación y subsecuente engrosamiento de los dispersoides, se diferencia de la fase α primaria por su menor contenido de hierro, relación Mn/Fe más alta y menor tamaño. En este trabajo, los pocos dispersoides que pudieron observarse tuvieron un tamaño que siempre fue ligeramente mayor a 1

μm debido al proceso de engrosamiento durante la homogeneización.

Dado que el hierro tiene muy poca solubilidad en aluminio sólido, la disminución del contenido de hierro en las partículas primarias para el material homogeneizado podría indicar que no todos los dispersoides en contacto con las partículas primarias son disueltos y absorbidos, sino que algunos de ellos pueden estar intercambiando átomos de manganeso por átomos de hierro con las partículas primarias. Esta podría ser la razón por la cual algunos dispersoides crecieron hasta un tamaño mayor a $1 \mu\text{m}$ e incluso se convirtieron en partículas primarias.

El compuesto identificado tentativamente como $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ fue la fase con la fracción en peso más alta encontrada en la aleación en la condición H, como fue verificado a través de la evaluación SEM así como en la condición DC. Esto podría deberse a la alta cantidad de silicio (0,357 % en peso) contenido en la aleación empleada en este trabajo comparada con las usadas por otros autores (0,1 % a 0,2 % en peso), dado que un contenido de silicio que exceda un porcentaje en peso de 0,07 favorece la precipitación de la fase α ; en contraste, un menor contenido de silicio promoverá la precipitación de la fase $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ [16].

Otro hallazgo en algunas áreas de las muestras en la condición DC fue la presencia de precipitados de forma rectangular, que fueron identificados, con la ayuda de análisis EDX, como Al_{6-7}Mn , ver Figura 9. Precipitados similares, en forma y composición, fueron observados por [15] y [18] en muestras de láminas de AA3003 obtenidas por colada continua. Por lo tanto, este podría ser una morfología de precipitado característica de este material.



Figura 9. Micrografía SEM mostrando precipitados de Al_{6-7}Mn en muestras DC

Adicionalmente, en la Figura 9 se nota que la longitud de estos precipitados es menor que $1 \mu\text{m}$; por

lo tanto, pueden ser clasificados como dispersoides. Estas partículas precipitan en las zonas dendríticas durante el proceso de colada continua a aproximadamente 350°C , temperatura a la cual se inicia la precipitación de los dispersoides.

3.4. Variación de la microestructura con el trabajo en frío

Las láminas de aleación de aluminio obtenidas por colada continua exhiben una concentración más alta de elementos de aleación en solución sólida sobresaturada, y partículas intermetálicas (eutécticas) más pequeñas, en comparación con otros tipos de colada. Estas características afectan el comportamiento termomecánico de la aleación durante los procesos de conformado. Las micrografías SEM de las muestras DC y H, sometidas a trabajo en frío como se describe en la sección experimental, fueron adquiridas para investigar este fenómeno y determinar la influencia tanto del trabajo en frío como del tratamiento térmico de homogeneización en la distribución de las fases. En la Figura 10 se observan las micrografías SEM para el material DC, con y sin trabajo en frío, de las posiciones externa y central de las muestras.

En la Figura 10(a) puede apreciarse la formación de redes eutécticas, en su etapa inicial, y estructuras dendríticas columnares, ambas elongadas en la dirección de laminación, en la zona exterior de la muestra. Esto es causado por el contacto directo de la superficie de la lámina con el rodillo durante el proceso de colada; por lo tanto, es la zona sometida a la tasa de enfriamiento y presión más altas.

La variación de la distribución de la microestructura con la cantidad de trabajo en frío aplicada se muestra en las Figuras 10(b) y (c). A medida que aumenta la deformación en frío, también aumenta la separación de las partículas primarias y secundarias contenidas en las regiones interdendríticas y dendríticas, respectivamente. Además, el número de partículas primarias también se incrementa, pero su tamaño se reduce.

La Figura 11 muestra una imagen de la zona central en una muestra DC, donde puede notarse una LSC. Esta línea fue observada en todas las muestras del material DC, lo cual confirma un control apropiado del proceso y una buena eficiencia en la extracción del calor por ambos rodillos. En un análisis EDX de perfil de línea realizado a la LSC, se encontró que a medida que se acerca a la zona central, existe una reducción de la concentración de aluminio y un aumento de los elementos de aleación, principalmente hierro, debido a su baja solubilidad en aluminio sólido.

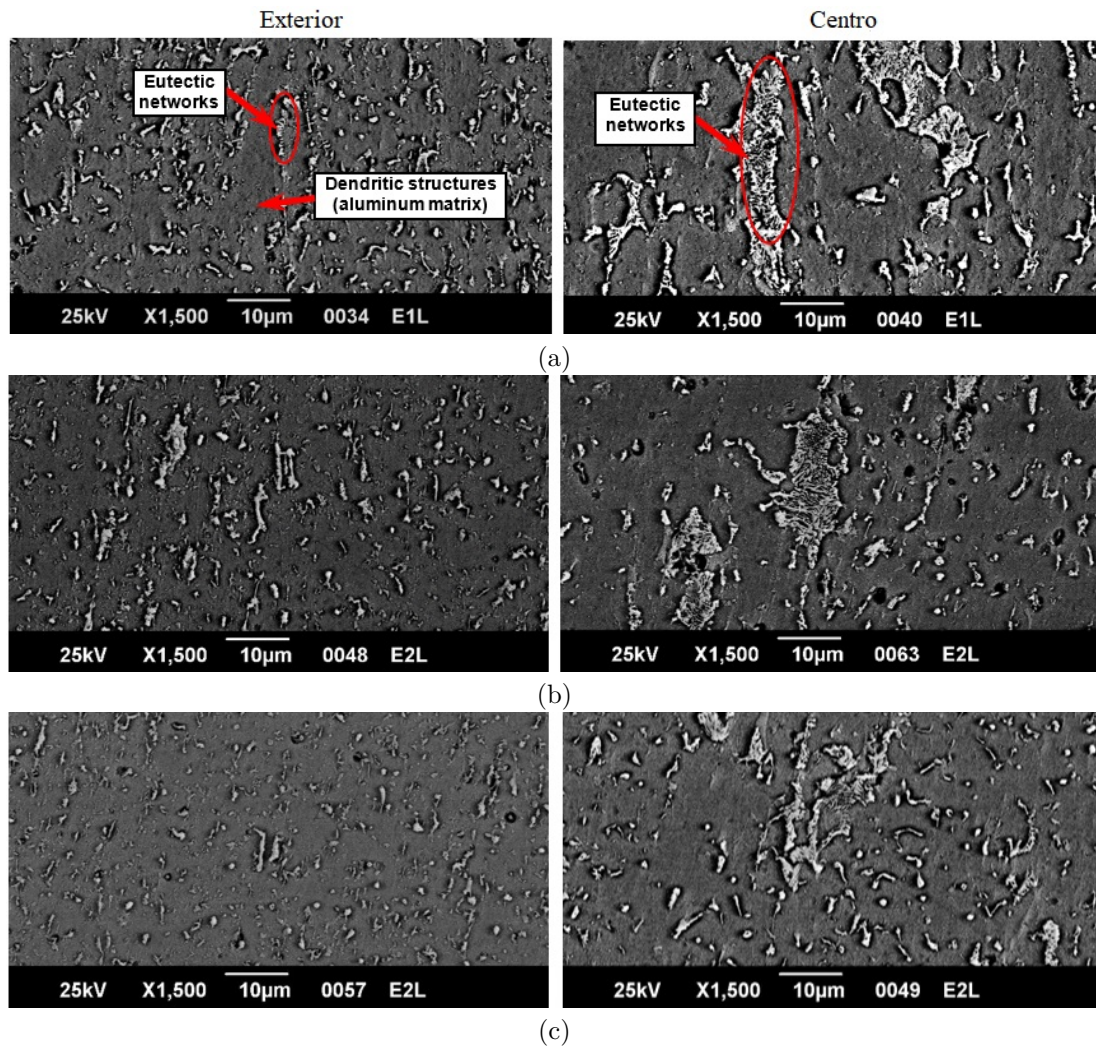


Figura 10. Micrografías SEM mostrando la variación de la microestructura en las posiciones externa y central de la muestra de AA3003 tal como fue recibida, con trabajo en frío: (a) 0 % CW, (b) 30 % CW, y (c) 60 % CW

La Figura 12 muestra la LSC luego de la homogeneización, confirmando la disminución en el número de segregados, en comparación con la Figura 11.

La Figura 13 presenta las micrografías SEM para el material homogeneizado, con y sin trabajo en frío, de las zonas externa y central de las muestras. En este caso se observaron partículas con un tamaño promedio de 2 a 3 μm en la posición externa de la muestra, mientras que en el centro estas tienen mayor tamaño, de 3 a 5 μm . Esto ocurre porque las primeras se originan de la ruptura de redes eutécticas que son mucho más pequeñas que las observadas en las posiciones media y central.

En la Figura 13(a) las partículas se agrupan en la forma de lo que previamente fueron las redes eutécticas localizadas en las regiones interdendríticas. A medida que se incrementa el nivel de trabajo en frío, estas partículas son desplazadas por el efecto del movimiento de los planos de deslizamiento, produciendo la pérdida de estos clústeres y mostrando alineamiento posterior

de los precipitados con la dirección de laminación (ver Figuras 12, 13(a) y 13(b)).

Nótese en la Figura 13 que, en contraste con la variación de la microestructura para la condición DC, no se observó un cambio sustancial en el tamaño de las partículas de la fase secundaria con el aumento del trabajo en frío en las muestras homogeneizadas. Esta condición contribuye a la homogeneidad de las propiedades mecánicas, lo cual es una evidencia de la efectividad de la aplicación del tratamiento térmico de homogeneización previo al proceso de formación en frío.

Torres *et al.* [20] determinaron que una tasa de difusión más alta, que se incrementa con el tiempo de homogeneización, induce una mayor disolución localizada de la LSC y, al mismo tiempo, una redistribución de los segregados en la matriz de aluminio, produciendo una microestructura más uniforme.

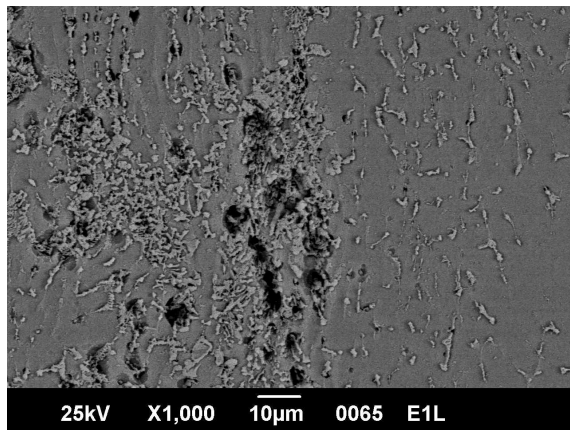


Figura 11. Micrografías SEM mostrando la LSC para el material como fue recibido

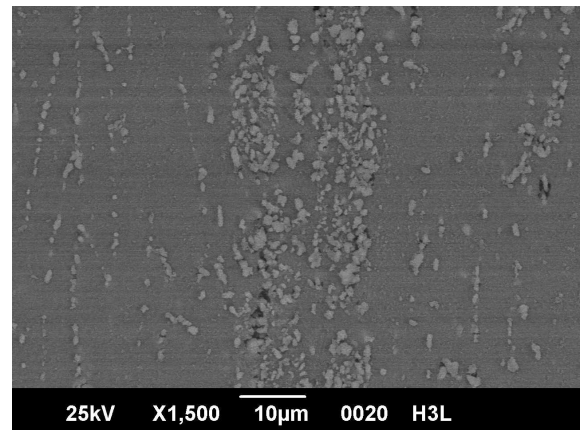


Figura 12. Micrografías SEM mostrando la LSC para el material homogeneizado

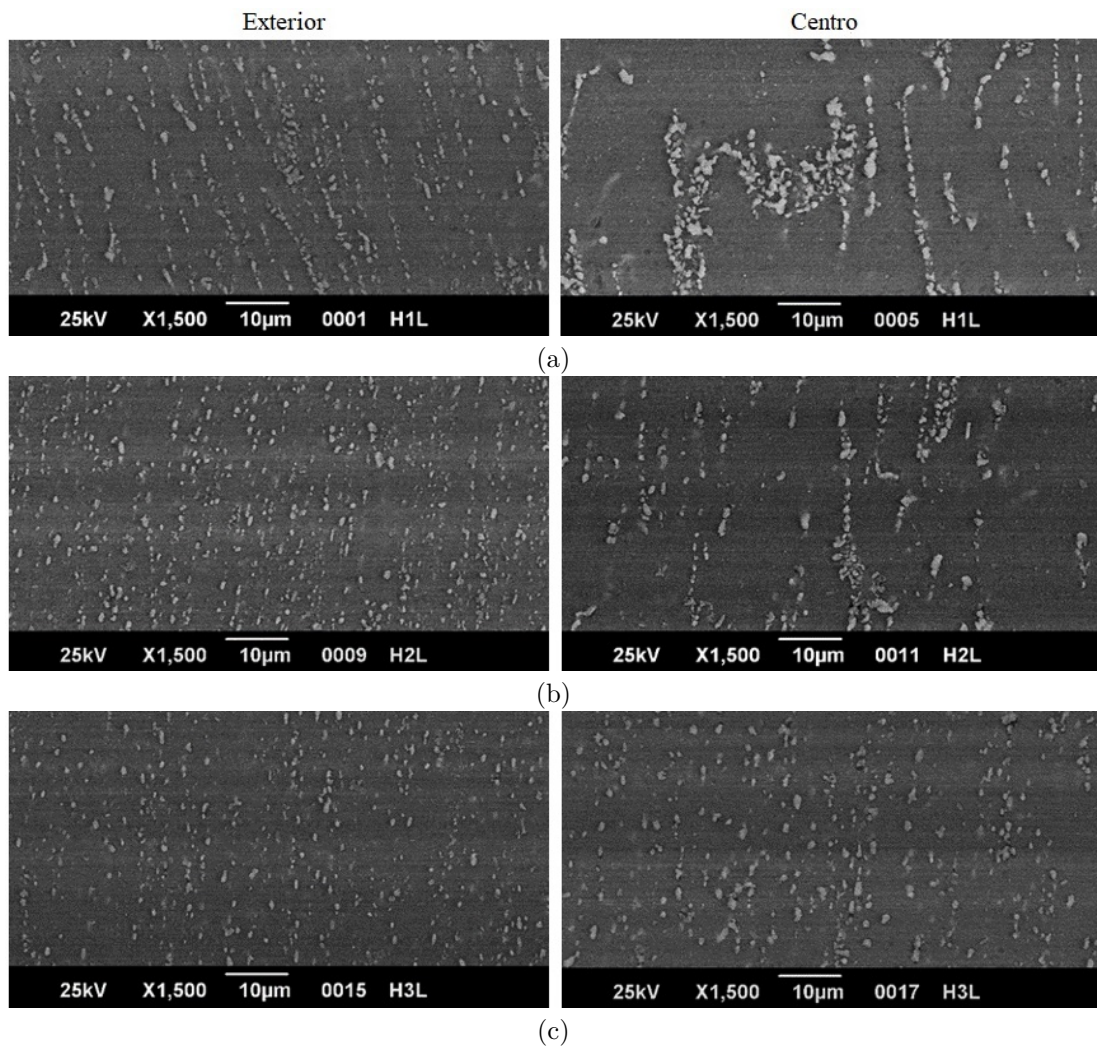


Figura 13. Micrografías SEM mostrando la variación de la microestructura de la muestra de AA-3003 homogeneizada con trabajo en frío, en las posiciones exterior y centro: (a) 0 % CW, (b) 30 % CW, (c) 60 % CW

3.5. Propiedades mecánicas

La Tabla 4 muestra la media y la desviación estándar de las propiedades mecánicas obtenida de los ensayos de tensión y microdureza. Se reportan límite elástico ($S_{0,2}$), resistencia a la tracción (S_u), ductilidad como función de porcentaje de reducción en el área (RA) y microdureza Vickers (HV).

Tabla 4. Propiedades mecánicas de AA3003 en las condiciones DC y H como función del trabajo en frío

Cond. Inicial	Propiedades	Trabajo en frío (%), media (DE)		
		0	30	60
DC	$S_{0,2}$ (MPa)	102 (1,99)	200 (3,10)	243 (4,30)
	S_u (MPa)	161 (0,054)	209 (0,920)	251 (1,50)
	RA (%)	53,9 (1,64)	43,1 (2,56)	28,6 (4,32)
	HV	52,8 (4,65)	70,8 (4,30)	78,4 (3,92)
H	$S_{0,2}$ (MPa)	44,5 (2,17)	148 (1,01)	187 (2,40)
	S_u (MPa)	112 (0,360)	155 (1,14)	195 (1,74)
	RA (%)	64,1 (2,59)	59,9 (0,480)	46,3 (5,63)
	HV	38,3 (2,03)	51,7 (4,96)	62,1 (2,75)

En la Tabla 4 se observa el aumento en la resistencia y dureza, y la disminución en la ductilidad, a medida que aumenta el trabajo en frío, independientemente de la condición inicial del material. Esto se debe al mecanismo de endurecimiento por deformación de esta aleación y está relacionado con la generación, movimiento y apilamiento de dislocaciones en los bordes del grano o diferentes obstáculos que pueden estar presentes en el cristal.

Las diferencias en resistencia y dureza entre los materiales tal como fueron recibidos y los homogeneizados se deben principalmente a dos mecanismos: el primero y más dominante es la restricción de movimiento de las dislocaciones por la presencia de más átomos de los elementos de aleación en solución sólida sobresaturada en la condición DC, lo cual fue confirmado por el espectro EDS mostrado en la Figura 7; el segundo mecanismo es el endurecimiento por la dispersión de partículas pequeñas en la matriz, tales como los precipitados $Al_{6-7}Mn$ encontrados en la condición DC y mostrados en la Figura 9 los cuales, de acuerdo con algunos investigadores son incoherentes con la matriz y promueven la formación de anillos de dislocación alrededor de ellos, endureciendo aún más la matriz de aluminio [18], [21].

La Tabla 5 ofrece la diferencia porcentual de las propiedades mecánicas en relación con la máxima cantidad de trabajo en frío, que fue 60 %. Comparando estos resultados, para el material homogeneizado antes del trabajo en frío (H) se obtuvieron incrementos más altos en la resistencia (320 % en comparación con 138 % para el material DC) y dureza (62,1 % en comparación con 48,5 % para el material DC), y una reducción más pequeña en ductilidad (-27,8 % en comparación con -46,9 % para el material DC).

Estos resultados indican que la homogeneización previa al trabajo en frío mejora considerablemente la capacidad de deformación plástica en frío de la aleación, debido a que la disminución en la ductilidad, medida como una función de la reducción en el área, es mucho menor que la obtenida sin homogeneización previa. Por otra parte, a pesar de que el material homogeneizado no alcanza la resistencia y dureza de la aleación directa de colada, comparando para los mismos porcentajes de deformación, los incrementos en estas propiedades son más significativos, lo cual indica que, al continuar el proceso de deformación plástica en frío, se obtendría un material con una mayor resistencia y dureza, además de la más alta capacidad de deformación en frío.

Estos resultados están correlacionados con los obtenidos en la sección 3.4, mostrando que el proceso de homogeneización de la aleación AA3003 obtenida por colada continua mejora su capacidad de deformación plástica y disminuye la probabilidad de agrietamiento durante el trabajo en frío posterior.

Tabla 5. Diferencias porcentuales de las propiedades mecánicas de AA3003 para las condiciones DC y H con respecto a la máxima cantidad de trabajo en frío (60 % CW)

Propiedades	Diferencia porcentual	
	DC	H
$S_{0,2}$ (MPa)	138	320
S_u (MPa)	55,9	74,1
RA (%)	-46,9	-27,8
HV	48,5	62,1

4. Conclusiones

Basándose en los resultados obtenidos para las diferentes condiciones evaluadas, las fases secundarias fueron identificadas tentativamente como $Al_6(Mn,Fe)$ y $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$, las cuales variaron en cantidad, tamaño y forma. Una identificación conclusiva requiere un análisis TEM, el cual no fue posible al momento de hacer esta investigación.

Las fases secundarias están compuestas de partículas primarias y secundarias, que difieren en su contenido de Fe y Mn, resultando en una menor relación Mn/Fe para las partículas primarias (0,57 para la condición como fue recibida y 0,80 para la condición homogeneizada), mientras que los dispersoides tienen una relación Mn/Fe más alta (1,56 después de la homogeneización).

La homogeneización debe ajustarse a un tiempo de exposición más largo, debido a que las partículas de la fase secundaria alineadas en la dirección de laminación, todavía pudieron observarse en la microestructura.

La homogeneización produce la descomposición de la matriz sólida sobresaturada a través de la disolución y precipitación de los dispersoides, además de la esfereoidización de las partículas primarias contenidas en las zonas interdendríticas. Debido a estos efectos, se espera que aumente la ductilidad del material, produciendo así condiciones favorables para la aplicación de procesos de conformado en frío.

La aplicación de trabajo en frío al material no homogeneizado causó la división y separación de las partículas de las fases secundarias. En contraste con este comportamiento, las partículas del material previamente homogeneizado mostraron menor variación en su tamaño. Esta es una condición deseable para aplicaciones posteriores de conformado, debido a la menor probabilidad de agrietamiento del material durante el trabajo en frío.

Lo anterior fue confirmado por los resultados obtenidos de resistencia, dureza y ductilidad. Hubo un incremento de 320 % en el límite elástico y una disminución de 27,8 % en la ductilidad para el material homogeneizado, en comparación con 138 % y 46,9 %, respectivamente, para el material no tratado, demostrando así que el material homogeneizado tiene una mayor capacidad para la deformación plástica en frío.

Agradecimientos

Al CDCH de la Universidad de Carabobo por financiar esta investigación.

A los Laboratorios de Microscopía Electrónica de Barrido y Microscopía Óptica de la Universidad Simón Bolívar y al Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo, por permitir el uso del equipo empleado en este trabajo.

Referencias

- [1] G. Aparicio, "Evaluación del comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 3003 proveniente de colada continua," Master's thesis, 2010.
- [2] M. Dehmas, E. Aeby-Gautier, P. Archambault, and M. Serrière, "Interaction between eutectic intermetallic particles and dispersoids in the 3003 aluminum alloy during homogenization treatments," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, no. 2, pp. 1059–1073, Feb. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1473-1>
- [3] Y. J. Li and L. Arnberg, "Quantitative study on the precipitation behavior of dispersoids in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization," *Acta Materialia*, vol. 51, no. 12, pp. 3415–3428, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00160-5)
- [4] Y. Li and L. Arnberg, *Precipitation of Dispersoids in DC-Cast AA3103 Alloy during Heat Treatment*. Grandfield J.F., Eskin D.G. (eds) Essential Readings in Light Metals. Springer, Cham, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48228-6_129
- [5] M. Velandia and B. Hidalgo, "Evolución estructural de la aleación AA-3003 sometida a tratamiento térmico de homogenización," in *7th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, San Cristóbal, Venezuela*, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/3fofH1V>
- [6] H.-W. Huang and B.-L. Ou, "Evolution of precipitation during different homogenization treatments in a 3003 aluminum alloy," *Materials & Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2685–2692, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.012>
- [7] Y. J. Li and L. Arnberg, "Precipitation of dispersoids in DC-cast 3003 alloy," in *Aluminium Alloys 2002 - ICAA8*, ser. Materials Science Forum, vol. 396. Trans Tech Publications Ltd, 7 2002, pp. 875–880. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.396-402.875>
- [8] ASTM, *ASTM E8 / E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International, West Conshohocken, 2004. [Online]. Available: http://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-21
- [9] —, *ASTM E3-01, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, 2001. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/E0003-01>
- [10] —, *ASTM E407-07(2015)e1, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. ASTM International, West Conshohocken, 1999. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01>
- [11] M. Dehmas, P. Weisbecker, G. Geandier, P. Archambault, and E. Aeby-Gautier, "Experimental study of phase transformations in 3003 aluminium alloys during heating by in situ high energy X-ray synchrotron radiation," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 400, no. 1, pp. 116–124, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.03.062>
- [12] G. E. Totten and D. S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and*

- Processes*. CRC Press, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SqMkTE>
- [13] ASTM, *ASTM E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM International, West Conshohocken ed., 2002. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1520/E0384-17>
- [14] J. Pérez-Illarbe Uriz, J. Faustmann Salas, and A. Suárez Sanabria, “Recristalización de bandas de aluminio procedentes de colada continua, laminadas en frío,” *Revista de Metalurgia*, vol. 36, no. 6, pp. 435–451, 2000. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2000.v36.i6.594>
- [15] M. Slámová, M. Karlík, F. Robaut, P. Sláma, and M. Véron, “Differences in microstructure and texture of Al-Mg sheets produced by twin-roll continuous casting and by direct-chill casting,” *Materials Characterization*, vol. 49, no. 3, pp. 231–240, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(03\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00011-1)
- [16] M. Poková, M. Cieslar, and J. Lacaze, “Enhanced aw3003 aluminum alloys for heat exchangers,” in *WDS’11 Proceedings of Contributed Papers, Part II*, 2011, pp. 141–146. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bYehcj>
- [17] M. M. R. Jaradeh and T. Carlberg, “Solidification studies of 3003 aluminium alloys with Cu and Zr additions,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 27, no. 7, pp. 615–627, 2011. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60116-3](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60116-3)
- [18] J. P. Martins, A. L. M. Carvalho, and A. F. Padilha, “Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semicontinuous casting processes,” *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 11, pp. 2966–2976, Jun. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3393-z>
- [19] Y. J. Li and L. Arnberg, “Evolution of eutectic intermetallic particles in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 347, no. 1, pp. 130–135, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00555-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00555-5)
- [20] T. Torres, R. Bisbala, S. Cameroa, and C. Llanos, “Estudio del efecto del tratamiento térmico de homogeneización en la microestructura y propiedades mecánicas de una aleación de aluminio AA8011,” *Acta Microscópica*, vol. 20, no. 2, pp. 165–173, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wCbT2K>
- [21] S. Y. Paredes-Dugarte and B. Hidalgo-Prada, “Micromecanismo de deformación durante la laminación en frío de la aleación comercial de aluminio 3003,” *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, no. 2, pp. 778–781, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/2SpEYQh>



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS MAPAS DE PATRONES DE FLUJO DEL REFRIGERANTE R600A EN UN COLECTOR/EVAPORADOR DE UNA BOMBA DE CALOR ASISTIDA POR ENERGÍA SOLAR

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW PATTERN MAP OF R600A IN A COLLECTOR/EVAPORATOR OF A SOLAR-ASSISTED HEAT PUMP

William Quitiaquez^{1,*} , Eduardo Cortez² , Karen Anchapaxi² ,
 C.A. Isaza-Roldán³ , César Nieto-Londoño⁴ , Patricio Quitiaquez¹ ,
 Fernando Toapanta-Ramos¹

Recibido: 30-10-2020, Recibido tras revisión: 26-05-2021, Aceptado: 08-06-2021, Publicado: 01-07-2021

Resumen

En la presente investigación se detallan los mapas de patrones de flujo que se generan en una tubería horizontal de un colector/evaporador componente de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar, utilizando el refrigerante R600a como fluido de trabajo. El estudio se realizó en una tubería de 3,8 mm de diámetro interno y 1000 mm de longitud, las velocidades de masa variaron entre 197,59 y 267,26 kg·m⁻²·s⁻¹, el flujo de calor entre 72,83 y 488,27 W·m⁻², durante las pruebas experimentales se presentó una radiación solar incidente entre 0 y 652,9 W·m⁻². Se consideró para el análisis la correlación de Wojtan, Ursenbacher y Thome, el modelo utilizado no requiere de cálculos iterativos, además, plantea un análisis detallado de las diferentes zonas presentes a lo largo de la tubería, evidenciando una mayor precisión en los resultados. Las zonas predominantes en los resultados de este estudio son intermitente, anular y secado, encontrados en las cinco pruebas, sin embargo, por las condiciones de trabajo en todas las pruebas a excepción de la prueba A, se encontró el flujo niebla y estratificado-ondulado.

Palabras clave: patrones de flujo, flujo bifásico, transferencia de calor, R600a

Abstract

This research work presents a detailed description of the flow patterns maps generated in a horizontal pipe of the collector/evaporator of a direct-expansion solar-assisted heat pump, using R600a refrigerant as working fluid. The study was performed in a pipe with an internal diameter of 3.8 mm and a length of 1000 mm, mass velocities varying between 197.59 and 267.26 kg·m⁻²·s⁻¹ and heat flux between 72.83 and 488.27 W·m⁻²; during the experimental tests, an incident solar radiation between 0 and 652.9 W·m⁻² was present. The Wojtan, Ursenbacher and Thome correlation was considered for the analysis and the model used does not require iterative calculations; moreover, it carries out a detailed analysis of the different zones present along the pipe. The predominant zones in this study are intermittent, annular and dryout, found in the five tests, however, due to the working conditions in all tests with the exception of test A, mist and stratified-wavy flow were found.

Keywords: Flow patterns, two-phase flow, heat transfer, R600a

^{1,*}Carrera de Ingeniería Mecánica - Programa de Maestría en Producción y Operaciones Industriales / GIERIMP, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: wquitiaquez@ups.edu.ec.

²Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

³Centro de Investigación en Refrigeración y Aire Acondicionado, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

⁴Facultad de Ingeniería Aeroespacial, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

Forma sugerida de citación: Quitiaquez, W.; Cortez, E.; Anchapaxi, K.; Isaza-Roldán, C.A.; Nieto-Londoño, C.; Quitiaquez, P. y Toapanta-Ramos, F. (2021). «Análisis numérico de los mapas de patrones de flujo del refrigerante R600a en un colector/evaporador de una bomba de calor asistida por energía solar». INGENIUS. N.º 26, (julio-diciembre). pp. 111-121. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.10>.

1. Introducción

Desde décadas pasadas hasta la actualidad se han instrumentado diferentes protocolos que ayuden a mitigar los problemas ambientales [1,2]. Abas *et al.* [3] indican que los sistemas de refrigeración se encuentran bajo un periodo de permiso prescrito del Protocolo de Kioto el cual, en conjunto con la Unión Europea y el Acuerdo de París, enfatizaron en la eliminación de refrigerantes que dañen la capa ozono y se propone reemplazarlos por refrigerantes naturales. Por ello alrededor del mundo se realizan investigaciones con los refrigerantes tipo hidrocarburo, como el R290 y R600a debido a que presentan un potencial de agotamiento de ozono (ODP, por sus siglas en inglés) de 0 y un potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) de 3 [4].

Yu *et al.* [5] utilizan los refrigerantes R290 y R600a como alternativa al R134a. Los resultados indican que los sistemas de refrigeración consumen menos electricidad y la carga del refrigerante es de 30 a 60 % menor con relación a la carga del R134a, llegando a la conclusión de que mejora el factor de energía de los sistemas de refrigeración disminuyendo la carga de refrigerante con el R600a y aliviando aún más las emisiones directas al medioambiente producidas por refrigerantes [6].

Los patrones de flujo predicen la hidrodinámica del flujo y la transferencia de calor que ocurre entre una tubería y el fluido que se transporta dentro de ella, al tener una mayor tasa de transferencia de calor, el refrigerante cambiará rápidamente de fase e ingresará al compresor netamente en la fase de vapor [7]. El régimen de flujo que predice un cambio de fase casi total es el patrón de flujo niebla visualizado a la salida del colector/evaporador, mismo que se presenta en investigaciones como las realizadas por Wojtan *et al.* [8].

Para determinar los patrones de flujo que se pueden presentar en tuberías horizontales se analiza la correlación de Wojtan *et al.* [8], debido a que proponen varias modificaciones al mapa propuesto por Kattan *et al.* [9]. La correlación de Wojtan *et al.* [8] no presenta cálculos iterativos e indica que la zona estratificada ondulada se subdivide en tres zonas más, siendo bache (slug), slug + estratificada ondulada y estratificada ondulada, además, se menciona un análisis extra en la transición de las zonas de anular a secado y de secado a niebla y a su vez se conoce el inicio y el final de la zona secado que se puede presentar en este tipo de tuberías.

Mashouf *et al.* [10] realizaron una investigación trabajando con tubos horizontales y el refrigerante R600a; presentaron diferentes patrones de flujo a velocidades de masa entre 114 y 368 kg·m⁻²·s⁻¹, con temperatura de saturación entre 38 y 42 °C y calidad de 0,8 para el proceso de ebullición del refrigerante. Los resultados obtenidos fueron un flujo intermitente y anular en un

tubo con hoyuelos, mientras que, para un tubo liso se observó un flujo intermitente, anular y estratificado ondulado. Así mismo, Vahabi *et al.* [11] efectuaron un estudio de los patrones de flujo en un tubo de cobre con diámetro interno de 8,7 y 1200 mm de longitud, con el uso del refrigerante R600a. La prueba fue realizada con valores de velocidad de masa (GA) entre 155 y 470 kg·m⁻²·s⁻¹ con una calidad entre 0,05 y 0,78, encontrando los flujos: intermitente, anular y estratificado ondulado para el tubo liso.

De Oliveira *et al.* [12] determinaron la caída de presión y los patrones de flujo al usar el refrigerante R600a, en un tubo horizontal de 1 mm de diámetro interno. Las condiciones de flujo de calor fluctuaron entre 5 y 60 kW·m⁻², velocidades de masa entre 240 y 480 kg·m⁻²·s⁻¹ y una temperatura de saturación de 25 °C, durante el proceso de ebullición lograron determinar que los flujos predominantes son tapón, slug y anular.

Yang *et al.* [13] estudiaron los patrones de flujo en dos fases que se pueden presentar en una tubería horizontal de diámetro interno de 6 mm, con el uso del refrigerante R600a. Los valores obtenidos de forma experimental fueron: flujo de calor (q) entre 10,6 y 75 kW·m⁻², velocidades de masa entre 67 y 194 kg·m⁻²·s⁻¹ y presiones de saturación entre 0,215 y 0,415 MPa. Utilizando una cámara de alta velocidad, observaron los flujos de tapón, estratificado ondulado, slug y anular.

Zhu *et al.* [14] investigaron los patrones de flujo durante el proceso de ebullición del refrigerante R32 en minicanales horizontales, trabajando con diámetros internos de 1 y 2 mm, temperaturas de saturación entre 10 y 20 °C, velocidades de masa entre 500 y 600 kg·m⁻²·s⁻¹, flujos de calor entre 10 y 30 kW·m⁻² y calidades de vapor entre 0 y 1. Los flujos que se observaron fueron slug, anular, secado, niebla y estratificado. Determinaron que la región del flujo slug es pequeña cuando se incrementa la velocidad de la masa y es mayor cuando se incrementa el diámetro del tubo, la temperatura de saturación o el flujo de calor. Para la región anular, es más pequeña cuando aumenta el diámetro del tubo, la temperatura de saturación, el flujo de calor o la velocidad de masa. La región del flujo niebla tiene una mayor presencia cuando incrementan su valor la temperatura de saturación, la velocidad de masa o el flujo de calor y se reduce cuando incrementa el diámetro del tubo.

Zhuang *et al.* [15] observaron los flujos: tapón, slug, intermitente y anular, donde concluyeron que las calidades de vapor disminuyen con el aumento de la velocidad de la masa, mientras que la variación de la presión de saturación no tiene mayor influencia en las zonas que se puedan presentar en los análisis. Liu *et al.* [16], en su investigación sobre patrones de flujo, identificaron seis zonas donde el flujo estratificado solo existe cuando la velocidad de la masa es baja, mientras

que, para la transición del flujo intermitente a anular, dependerá de la velocidad de la masa y el flujo de calor, es decir, si estas aumentan la línea de transición cambiará a una calidad más baja.

De Oliveira *et al.* [17] estudiaron la transferencia de calor por ebullición utilizando como fluido de trabajo el refrigerante R600a en una tubería horizontal de diámetro interno de 1 mm. Las pruebas se llevaron a cabo usando diferentes rangos de flujo de calor y velocidad de masa de 5 a 60 kW·m⁻² y de 240 a 480 kg·m⁻²·s⁻¹, respectivamente, además de una temperatura de saturación de 25 °C. Los patrones de flujos observados dentro de las pruebas realizadas son anular ondulado, anular liso, slug y tapón, siendo los flujos anulares los predominantes dentro de todas las pruebas experimentales.

Nasr *et al.* [18] investigaron la transferencia de calor durante la ebullición del R600a en un tubo horizontal con 8,7 mm de diámetro interior. Las pruebas se realizaron variando los rangos de velocidad de masa y flujo de calor de 130 a 380 kg·m⁻²·s⁻¹ y de 10 a 27 kW·m⁻². Para valores de calidad hasta 0,7 los patrones de flujo predominantes dentro de todas las pruebas experimentales son: intermitente y anular.

El presente estudio fue desarrollado para investigar los mapas de patrones de flujo en un colector/evaporador sobre el cual incide radiación solar, utilizando como fluido de trabajo el refrigerante R600a durante el proceso de ebullición. Para ello se realizaron cinco pruebas experimentales a diferentes horarios, donde la transición de flujo será determinada basándose en la correlación propuesta por Wojtan *et al.* [8].

2. Materiales y métodos

La combinación de una bomba de calor y energía solar se conoce como un sistema de bomba de calor asistida por energía solar (SAHP, por sus siglas en inglés). Al momento de fusionar el colector y el evaporador en un solo componente, el sistema se convierte en una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar (DX-SAHP, por sus siglas en inglés) [19]. El coeficiente de operación (COP) de los sistemas DX-SAHP se encuentra por encima del sistema de bomba de calor convencional, debido a las altas temperaturas generadas por su fuente de energía solar [20]. Los sistemas DX-SAHP tienen un gran potencial en diversas aplicaciones, como calentamiento de espacios, de agua, están conformados por un colector/evaporador, un compresor, un condensador y una válvula de expansión [21].

Su ciclo de trabajo inicia cuando el refrigerante a baja temperatura y presión ingresa al colector/e-

vaporador desde la válvula de expansión, luego se vaporiza al recibir la radiación solar incidente. Al llegar al compresor el fluido se comprime aumentando la temperatura y presión, después de la compresión el vapor fluye hacia el condensador y libera calor hacia el medio que lo contiene [22]. Posteriormente, la válvula de expansión reduce la temperatura y la presión del refrigerante que proviene de la salida del condensador, finalmente, el refrigerante ingresa al colector/evaporador y el proceso se repite. En la Figura 1 se observa un esquema del sistema DX-SAHP construido [23].

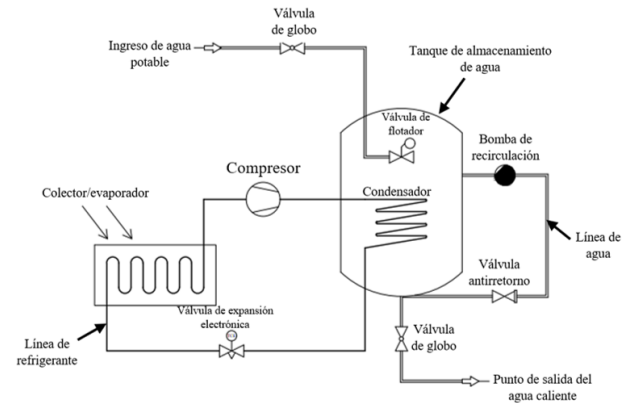


Figura 1. Sistema DX-SAHP propuesto

2.1. Colector/evaporador

En la Figura 2 se observa un esquema del colector/evaporador utilizado para el análisis de los mapas de patrones de flujo, del cual se obtuvieron los datos experimentales para proceder con el análisis. Las dimensiones de la tubería horizontal utilizada dentro del colector/evaporador son: diámetro interno de 3,8 mm, longitud de la tubería de 1000 mm, ancho del colector de 223,4 mm y área transversal del colector de 223 400 mm².

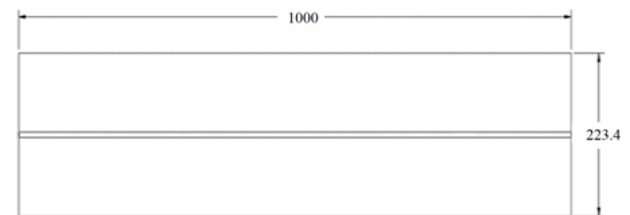


Figura 2. Diagrama esquemático del colector/evaporador [2]

Se realizaron pruebas de funcionamiento en diferentes horarios, en la Tabla 1 se presentan los datos experimentales más relevantes.

Tabla 1. Datos experimentales para 5 pruebas distintas

Variables	Prueba A	Prueba B	Prueba C	Prueba D	Prueba E
Hora	12:15	12:40	12:30	16:45	20:40
Temperatura ambiente [°C]	17,6	18,3	17,9	15,4	12
Radiación solar incidente promedio [W·m ⁻²]	464,1	652,9	582,6	123,22	0
Flujo másico [kg·s ⁻¹]	0,00268	0,00303	0,00295	0,0026	0,00224
Calidad de vapor [-]	0,176	0,256	0,215	0,2305	0,2325
Temperatura superficial [°C]	14,5	14,5	14,5	12,6	9,5

2.2. Correlación de Wojtan, Ursenbacher y Thome

A partir del estudio realizado por Wojtan *et al.* [8] el cual es una actualización de la correlación de Kattan *et al.* [9] se identifican las ecuaciones para determinar cada una de las zonas que se pueden presentar en el colector/evaporador. La ventaja de utilizar esta correlación es que no presenta ningún cálculo iterativo siendo su estudio confiable y uno de los más actuales e implementados en varias investigaciones como las realizadas por Singh *et al.* [24] y Yang y Hrnjak [25].

2.2.1. Fracción de vacío y flujo estratificado

Wojtan *et al.* [8] proponen la Ecuación (1) como la forma de obtener la fracción de vacío, mientras que el ángulo estratificado se lo obtiene a partir de la Ecuación (2), además, es necesario conocer la altura del líquido y el perímetro adimensional de la interfaz, mostrados en las Ecuaciones (3) y (4), respectivamente [26].

$$\alpha = \frac{x}{\rho_v} \left\{ \left[1 + 0.12(1-x) \right] \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_L} \right) \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{1.18(1-x)[g\sigma(\rho_L - \rho_v)]^{0.25}}{GA\rho_L^{0.5}} \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$\theta_{strat} = 2\pi - 2 \left\{ \dots \left[1 - 2(1-\alpha) + (1-\alpha)^{\frac{1}{3}} - \alpha^{\frac{1}{3}} \right] \dots \right. \\ \left. \dots - \frac{1}{200}(1-\alpha)\alpha[1 - 2(1-\alpha)] \dots \right. \\ \left. \dots \left[1 + 4 \left[(1-\alpha)^2 + \alpha^2 \right] \right] \right\} \quad (2)$$

$$h_{Ld} = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi - \theta_{strat}}{2} \right) \right] \quad (3)$$

$$P_{id} = \sin \left(\frac{2\pi - \theta_{strat}}{2} \right) \quad (4)$$

2.2.2. Flujo estratificado a estratificado ondulado

Wojtan *et al.* [8] proponen la Ecuación (5) como el cálculo necesario para obtener el flujo estratificado,

donde $G_{strat} = G_{strat}(x_{IA})$ a $(x < x_{IA})$ e indica que el flujo es estratificado cuando $G_A < G_{strat}$.

$$G_{strat} = \left[\frac{(226.3)^2 A_{Ld} A_{vd}^2 \rho_v (\rho_L - \rho_v) g \mu_L}{x^2 (1-x) \pi^3} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

2.2.3. Límite entre el flujo estratificado ondulado a intermitente anular

La Ecuación (6) indica el análisis necesario para el cálculo en la zona ondulada, indicando que se pueden encontrar tres zonas diferentes, siendo:

Zona slug: $G > G_{wavy}(x_{IA})$

Zona slug/estratificada con ondas:

$G_{strat} < G_A < G_{wavy}(x_{IA})$ y $x < x_{IA}$

Zona estratificada ondulada: $x \geq x_{IA}$

$$G_{wavy} = \left\{ \frac{16A_{vd}^3 g D \rho_L \rho_v}{x^2 \pi^2 [1 - (2h_{Ld} - 1)^2]^{0.5}} \dots \right. \\ \left. \dots \left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2} \left(\frac{We}{Fr} \right)_L^{-1} + 1 \right] \right\}^{0.5} + 50 \quad (6)$$

2.2.4. Transición de intermitente a anular

Wojtan *et al.* [8], Yang *et al.* [27], indican que la Ecuación (7) es necesaria para determinar la transición del flujo intermitente a anular.

$$x_{IA} = \left\{ \left[0.34^{\frac{1}{0.875}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{-\frac{1}{1.75}} \left(\frac{\mu_v}{\mu_L} \right)^{\frac{1}{7}} \right] + 1 \right\}^{-1} \quad (7)$$

2.2.5. Anular a secado

La Ecuación 8 muestra el análisis que se debe considerar al momento de determinar la zona secada, propuesta por Wojtan *et al.* [8] y utilizada por Yang *et al.* [27].

$$G_{dryout} = \left\{ \frac{1}{0.235} \left[\ln \left(\frac{0.58}{x} \right) + 0.52 \right] \left(\frac{D}{\rho_v \sigma} \right)^{-0.17} \dots \right. \\ \left. \dots \left[\frac{1}{g D \rho_v (\rho_L - \rho_v)} \right]^{-0.37} \dots \right. \\ \left. \dots \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{-0.25} \left(\frac{q}{q_{crit}} \right)^{-0.70} \right\}^{0.926} \quad (8)$$

2.2.6. Secado a niebla

El cálculo para el cambio entre flujo secado a niebla se determina a partir de la Ecuación (9) propuesta por Wojtan *et al.* [8].

$$G_{mist} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{1}{0.0058} \left[\ln \left(\frac{0.61}{x} \right) + 0.57 \right] \left(\frac{D}{\rho_v g} \right)^{-0.38} \dots \\ \dots \left[\frac{1}{g D \rho_v (\rho_L - \rho_v)} \right]^{-0.15} \dots \\ \dots \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0.69} \left(\frac{q}{\dot{q}_{crit}} \right)^{-0.27} \end{array} \right\}^{0.926} \quad (9)$$

Para definir las transiciones en el rango de calidad es necesario conocer las siguientes condiciones [8]:

$$\text{Si: } G_{strat} \geq G_{dryout} \Rightarrow G_{dryout} = G_{strat}$$

$$\text{Si: } G_{wavy} \geq G_{dryout} \Rightarrow G_{dryout} = G_{wavy}$$

Sin embargo, para las ecuaciones de secado y niebla los valores máximos de calidad son 0,99 especificado por Wojtan *et al.* [8]- [28] y De Oliveira *et al.* [12]- [29].

3. Resultados y discusión

A partir de datos experimentales y la correlación de Wojtan *et al.* [8], se obtienen los mapas de patrones de flujo correspondientes a cada una de las pruebas realizadas en diferentes horarios.

Cada una de las zonas presentes en los mapas de patrones de flujo se identifican aplicando la siguiente nomenclatura: Intermitente (I), Anular (A), Estratificado (S), Estratificado ondulado (SW), Secado (D) y Niebla (M). Conforme el refrigerante circula a lo largo de la tubería del colector/evaporador, su calidad aumenta, dando lugar a la presencia de los diferentes patrones de flujo.

3.1. Mapas de patrones de flujo en diferentes pruebas experimentales

3.1.1. Mapa de patrones de flujo de la prueba A

En la Figura 3 se observa el mapa de patrón de flujo obtenido a las 12:15.

La velocidad de masa de $236,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ indica que las zonas presentes en esta tubería del colector/evaporador, son intermitente, anular y secado, con rangos de calidad de 0,176-0,2686, 0,2686-0,9484 y 0,9484-0,99, respectivamente. Se muestra un rango de visualización mayor en la zona anular, mientras que la zona secada es la que menos visualización presenta.

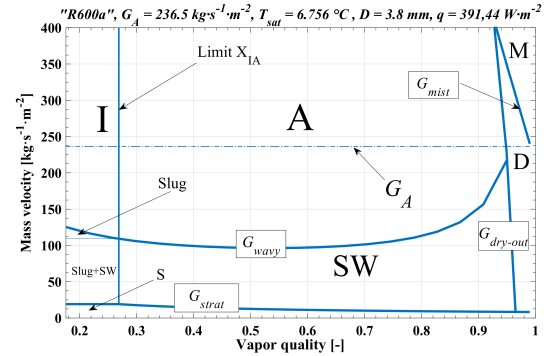


Figura 3. Mapa de patrones de flujo de la prueba A para el refrigerante R600a con una $T_{sat} = 6,756 \text{ °C}$, $D = 3,8 \text{ mm}$, $q = 391,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ y $G_A = 236,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

3.1.2. Mapa de patrones de flujo de la prueba B

La prueba B se la realizó a las 12:40, obteniendo los patrones de flujo intermitente, anular, secado y niebla, los cuales se visualizan en la Figura 4. En comparación con la prueba A, se presenta una nueva zona con una velocidad de masa de $267,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y con rangos de calidades de 0,256-0,283, 0,283-0,941, 0,98-0,979 y 0,979-0,99, respectivamente a las cuatro zonas presentes.

La zona con mayor visualización es la anular, por el rango extendido de calidad, mientras que la zona intermitente es aquella que presenta menor visualización debido a su pequeño rango de calidad.

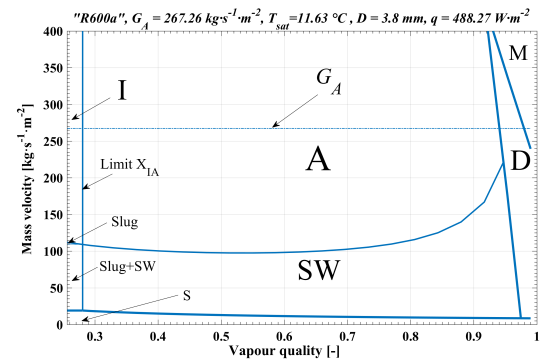


Figura 4. Mapa de patrones de flujo de la prueba B para el refrigerante R600a con una $T_{sat} = 11,63 \text{ °C}$, $D = 3,8 \text{ mm}$, $q = 488,27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ y $G_A = 267,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

3.1.3. Mapa de patrones de flujo de la prueba C

La Figura 5 muestra los patrones de flujo de la prueba C a partir de los datos obtenidos a las 12:30, con una velocidad de masa de $260,115 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Se presentan cuatro zonas: intermitente, anular, secado y

niebla, ubicadas en rangos de calidad de 0,215-0,275, 0,275-0,943, 0,943-0,982 y 0,982-0,99, respectivamente.

Tanto en la prueba A como en B, la zona con mayor visualización es la anular y el flujo intermitente presenta un rango pequeño como la zona secada.

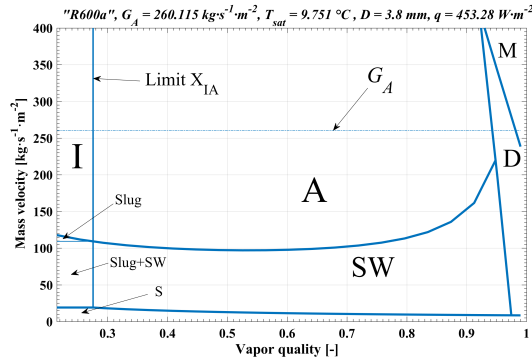


Figura 5. Mapa de patrones de flujo de la prueba C para el refrigerante R600a con una $T_{\text{sat}} = 9,751 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $D = 3,8 \text{ mm}$, $q = 453,28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $G_A = 260,115 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

3.1.4. Mapa de patrones de flujo de la prueba D

El mapa de patrones de flujo obtenido a partir de los datos experimentales tomados a las 16:45, con una velocidad de masa de $229,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ presenta las zonas intermitente, anular, estratificado ondulado y secado, tal como lo indica la Figura 6.

Los rangos de calidades presentes según los flujos son 0,231-0,267, 0,267-0,952, 0,952-0,961 y 0,961-0,99, respectivamente. La zona que presenta una mayor visualización es la anular, por su rango de calidad, mientras que las demás zonas se presentan en rangos menores de calidad. Las condiciones de trabajo son distintas, no solo la velocidad de masa también influye, el tiempo de toma de datos, por ello se presenta una nueva zona, la estratificada ondulado.

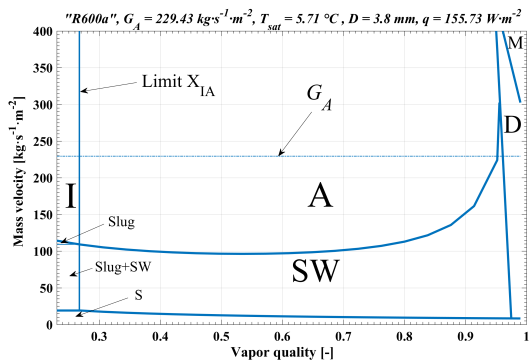


Figura 6. Mapa de patrones de flujo de la prueba D para el refrigerante R600a con una $T_{\text{sat}} = 5,71 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $D = 3,8 \text{ mm}$, $q = 155,73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $G_A = 229,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

3.1.5. Mapa de patrones de flujo de la prueba E

La Figura 7 indica el mapa de patrones de flujo de la prueba E, obtenido a partir de los datos experimentales tomados a las 20:40, donde con una velocidad de masa de $197,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, los flujos que se presentan en esta prueba son intermitente, anular, estratificado ondulado y secado.

El rango que presenta una mayor visualización es el de la zona anular, mientras que las zonas intermitente y secado son más pequeñas. Como la prueba D, al tener una velocidad de masa menor a las anteriores, se presenta la zona estratificada ondulado.

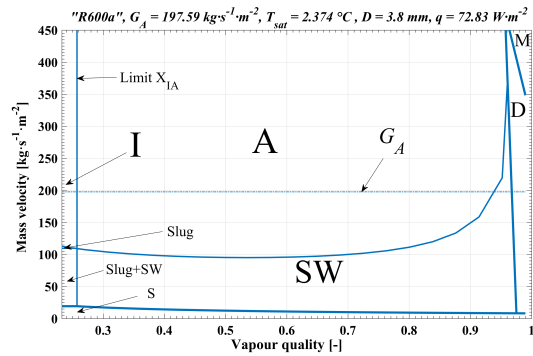


Figura 7. Mapa de patrones de flujo de la prueba E para el refrigerante R600a con una $T_{\text{sat}} = 2,374 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $D = 3,8 \text{ mm}$, $q = 72,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $G_A = 197,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

Todas las pruebas indican que los patrones de flujo varían dependiendo de las condiciones de trabajo, por ello, se determina que a medida que la velocidad de la masa es mayor, tiende a estar presente el flujo niebla, mientras que si esta disminuye se puede presentar la zona estratificada ondulado. Además, de las zonas presentes en las cinco pruebas, la de mejor visualización y con mayor rango de calidad viene a ser el flujo anular, siendo aquella que predomina en este estudio, al igual que las zonas intermitente y secado, pero con un menor rango de calidad.

3.2. Comparación de los patrones de flujo en diferentes horarios

A continuación, se realiza un análisis en dependencia de los horarios y los resultados obtenidos en los patrones de flujo, así como la diferencia de sus condiciones de trabajo.

3.2.1. Comparación de la prueba A con la prueba B

La Figura 8 presenta la comparación de resultados de la prueba A con horario de 12:15 y de la prueba B con horario de 12:40. La radiación solar incidente es de 464,1 y 652,9 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y la velocidad de masa es de 236,5 y 267,26 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Se puede

observar que los límites del flujo anular con el estratificado ondulado y niebla, no presentan una variación, mientras que en el límite de la zona secada ya existe un pequeño desfase, así como el límite intermitente anular, en el cual sus calidades iniciales varían de 0,176 a 0,256.

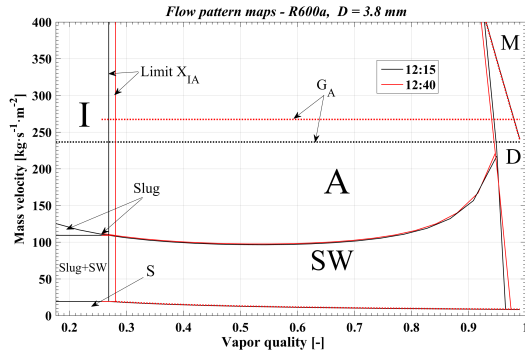


Figura 8. Comparación de los mapas de las pruebas A y B en horarios de 12:15 y 12:40, respectivamente

3.2.2. Comparación de la prueba A con la prueba D

La Figura 9 presenta una comparación entre las pruebas A y D, con datos tomados en los horarios de 12:15 y 16:45, radiación solar incidente de 391,44 y 155,73 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y velocidades de masa de 236,5 y 229,43 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Los límites de estratificado y ondulado no presentan ninguna variación, lo cual para los demás límites no es el caso.

En el caso de la prueba B, la velocidad de masa no indica que se presente el flujo estratificado ondulado en esa prueba, sin embargo, en la prueba D, la velocidad de masa es menor y muestra la zona estratificada ondulada. Mientras que los límites de las zonas secado y niebla de la prueba D se mueven a la derecha por el incremento de la radiación solar incidente.

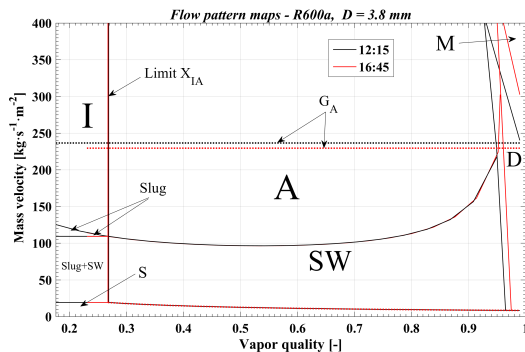


Figura 9. Comparación de los mapas de las pruebas A y D en horarios de 12:15 y 16:45, respectivamente

3.2.3. Comparación de la prueba D con la prueba E

La siguiente comparación se muestra en la Figura 10, se comparan las pruebas D y E, con toma de datos experimentales a las 16:45 y 20:40, radiación solar incidente de 123,22 y 0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y velocidades de masa de 229,43 y 197,59 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Los límites de la zona estratificada ondulada no muestran variación, mientras que, para los límites de la zona secada y niebla, muestran una tendencia a la derecha cuando disminuye la radiación solar incidente en valores de calidad altos. Ambas pruebas indican la presencia de la zona estratificada ondulada con los valores de velocidad de masa mencionados, sin embargo, en la prueba D se logra una mejor visualización del flujo debido a que la velocidad de masa disminuye al ser la radiación solar incidente 0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

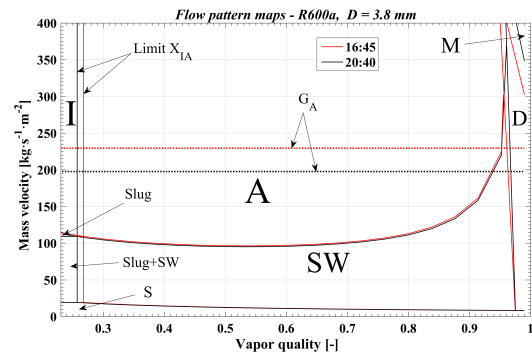


Figura 10. Comparación de los mapas de las pruebas D y E en horarios de 16:45 y 20:40, respectivamente

3.2.4. Comparación de la prueba A con la prueba E

En la Figura 11 se observa la comparación de los mapas de patrones de flujo entre la prueba A y E, con horarios de trabajo de 12:15 y 20:40, radiación solar incidente de 464,1 y 0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y velocidad de la masa de 236,5 y 197,59 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. El límite estratificado ondulado no presenta variación, mientras que los límites secado y niebla se mueven a la derecha en comparación de los límites resultantes del mediodía. La diferencia entre la prueba A y E al presentar las velocidades de masa antes mencionadas, indica que solo la prueba E tiene el flujo estratificado ondulado, mientras que la prueba A no.

3.2.5. Comparación de las pruebas A, D y E

En la Figura 12 se presenta una comparación entre las pruebas A, D y E con horarios de trabajo de 12:15, 16:45 y 20:40, con radiación solar incidente de 464,1, 123,22 y 0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente. Se analiza que la velocidad de masa en la gráfica es directamente proporcional a la radiación solar.

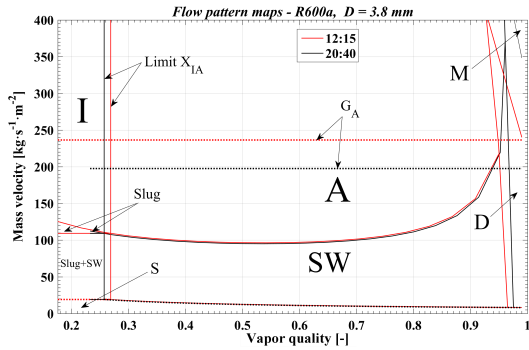


Figura 11. Comparación de los mapas de las pruebas A y E

Al reducir ambas variables, las zonas secado y niebla se prolongan a la derecha con valores de calidad altos, mientras que los límites de estratificado ondulado no sufren variación. Se indica cómo el límite x_{IA} varía en el inicio de las calidades. Con la velocidad de la masa se pueden identificar las zonas que se presentan en la tubería de acuerdo con cada una de las condiciones, si es más alta será el caso de la prueba A y si es más bajo el caso de la prueba D y E. Las zonas presentes en la prueba A son: intermitente, anular y secado, mientras que para la prueba D y E las zonas presentes son intermitente, anular, estratificado ondulado y secado.

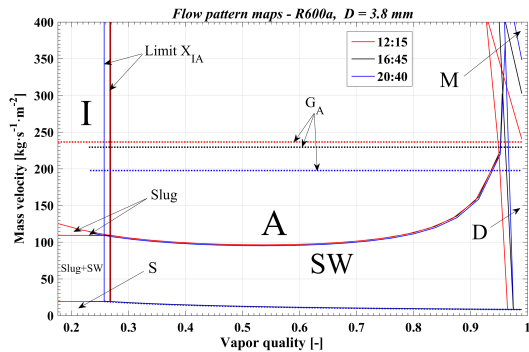


Figura 12. Comparación de los mapas de patrón de flujo con radiación solar incidente a distintos horarios

En los diferentes mapas obtenidos, la prueba A muestra los mejores resultados al tener una calidad inicial menor, los límites dentro de la gráfica observados en la Figura 3, se asemejan al modelo de Wojtan *et al.* [8] considerado para el análisis del fluido en ebullición. Además, una de las condiciones predominantes dentro de un sistema DX-SAHP es tener a la salida del colector/evaporador un fluido de trabajo en fase de vapor, los patrones de flujo que se acomodan a esta condición son: secado y niebla, los cuales se presentan en mayores rangos de calidad de 0,941-0,99 para la prueba B observada en la Figura 4.

En la Figura 13 se evidencia la relación entre los patrones de flujo y el coeficiente de transferencia de

calor (HTC), los patrones de flujo fundamentan su importancia al indicar el cambio de fase de un refrigerante que fluye a través de una tubería. La figura mencionada muestra las zonas: intermitente, anular, secado y niebla. Para los patrones de flujo como intermitente y anular el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor presenta una tendencia creciente; al iniciar la zona de secado el HTC tiende a decrecer con el incremento de la calidad de vapor [8]. El fluido de trabajo alcanza un balance calórico cuasi total con la tubería y al llegar a la zona niebla cambia su fase de líquido a vapor completamente, por lo que, el HTC en las zonas secado y niebla tiende a descender a valores mínimos de $516,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, para el ejemplo mostrado.

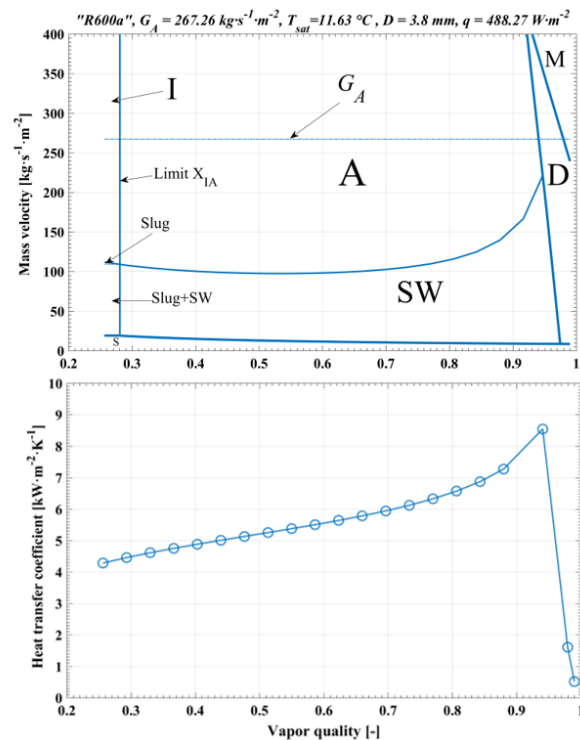


Figura 13. Contrastación de los mapas de patrones de flujo *vs.* coeficiente de transferencia de calor bajo el modelo matemático de Wojtan *et al.* [8], [28]

4. Conclusiones

Los mapas de patrones de flujo obtenidos en las pruebas experimentales realizadas representan el comportamiento del cambio de fase del refrigerante R600a como respuesta a la energía solar ganada en el sistema. Las gráficas y los límites de los diferentes regímenes de flujo presentaron una variación a partir de los diferentes parámetros de trabajo como: velocidad de masa, radiación solar incidente, flujo de calor, flujo másico [23] y calidad inicial del fluido de trabajo. Así

mismo, los mapas de patrones de flujo permiten estudiar las distintas configuraciones de distribución de dos fases en un fluido e indican que zona predice el cambio de fase casi total del mismo, para ello se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Las zonas predominantes en este estudio son intermitente, anular y secado, al ser los flujos que se presentan en todas las pruebas y las zonas secado y niebla, presentes en diferentes ocasiones. Tal es el caso de la zona niebla, la cual estará presente cuando el flujo de calor y velocidad de masa sean de $488,27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $267,26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente, mientras que, para la zona estratificada ondulada el flujo de calor y la velocidad de masa serán $72,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $197,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

La zona estratificada ondulada se presentó en las pruebas D y E, en rangos de calidad entre 0,952-0,961 y 0,939-0,968 respectivamente. Mientras que, la zona niebla se presenta en la prueba B con rangos de calidad de 0,979-0,99 y en la prueba C con rangos de calidad de 0,982-0,99. Además, las pruebas D y E se obtuvieron con valores de radiación solar incidente de 123,22 y $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

La prueba A al tener una calidad inicial de 0,176 se asemeja más al modelo de mapa de patrón de flujo tomado como base para este estudio. Sin embargo, en las pruebas B y C se visualiza la mayor zona de secado y niebla, cumpliendo con la condición de que un fluido debe ingresar en fase vapor al compresor.

La presente investigación se realizó utilizando un refrigerante amigable con el medioambiente como el isobutano R600a que presenta un ODP de 0 y un GWP de 3, además su uso presenta mayores conductividades térmicas con referencia a los refrigerantes convencionales como el R22 y el R134a.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de Investigación en Energías Renovables e Implementación Mecánica de PYMES de la Universidad Politécnica Salesiana y al Grupo de Investigación Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín.

Referencias

[1] J. Calle-Sigüencia and O. Tinoco-Gómez, "Obtención de ACS con energía solar en el cantón Cuenca y análisis de la contaminación ambiental," *Ingenius*, no. 19, pp. 89–101, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.09>

[2] W. Quitiaquez, J. Estupiñán Campos, C. Isaza Roldán, F. Toapanta-Ramos, and A. Lobato-Campoverde, "Análisis numérico de un sistema de calentamiento de agua utilizando un colector solar de placa plana," *Ingenius*,

no. 24, pp. 97–106, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.10>

[3] N. Abas, A. R. Kalair, N. Khan, A. Haider, Z. Saleem, and M. S. Saleem, "Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 557–569, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.099>

[4] K. Nawaz, B. Shen, A. Elatar, V. Baxter, and O. Abdelaziz, "R290 (propane) and R600a (isobutane) as natural refrigerants for residential heat pump water heaters," *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 870–883, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.080>

[5] C.-C. Yu and T.-P. Teng, "Retrofit assessment of refrigerator using hydrocarbon refrigerants," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 507–518, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>

[6] X. Zhuang, M. Gong, X. Zou, G. Chen, and J. Wu, "Experimental investigation on flow condensation heat transfer and pressure drop of R170 in a horizontal tube," *International Journal of Refrigeration*, vol. 66, pp. 105–120, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.02.010>

[7] J. C. Pérez Angulo, C. Simancas, and N. Santos Santos, "Modelamiento y simulación de un sistema no convencional de levantamiento multifásico," *Fuentes, el reventón energético*, vol. 14, no. 1, pp. 19–34, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18273/revfue.v14n1-2016002>

[8] L. Wojtan, T. Ursenbacher, and J. R. Thome, "Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 14, pp. 2955–2969, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.012>

[9] N. Kattan, J. R. Thome, and D. Favrat, "Flow boiling in horizontal tubes: Part 1—Development of a diabatic two-phase flow pattern map," *Journal of Heat Transfer*, vol. 120, no. 1, pp. 140–147, Oct. 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.2830037>

[10] H. Mashouf, M. Shafae, A. Sarmadian, and S. Mohseni, "Visual study of flow patterns during evaporation and condensation of R-600a inside horizontal smooth and helically dimpled tubes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 1392–1400, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.125>

- [11] A. Vahabi, M. Shafaei, A. Sarmadian, and H. Mashouf, "Discovering an empirically new relation and obtain the flow pattern map for dimpled tubes in two-phase flow for refrigerant R600a," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 7, 2017. [Online]. Available: <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7>
- [12] J. D. de Oliveira, J. B. Copetti, and J. C. Passos, "Experimental investigation on flow boiling pressure drop of R-290 and R-600a in a horizontal small tube," *International Journal of Refrigeration*, vol. 84, pp. 165–180, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.08.004>
- [13] Z.-Q. Yang, M. Gong, G. Chen, Z. Lin, H. Huang, and H. Feng, "A new diabatic two phase flow pattern transition model of R600a," *International Journal of Refrigeration*, vol. 99, pp. 138–144, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.025>
- [14] Y. Zhu, X. Wu, and R. Zhao, "R32 flow boiling in horizontal mini channels: Part I. Two-phase flow patterns," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, pp. 1223–1232, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.101>
- [15] X. Zhuang, M. Gong, G. Chen, X. Zou, and J. Shen, "Two-phase flow pattern map for R170 in a horizontal smooth tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 1141–1149, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.094>
- [16] J. Liu, J. Liu, and X. Xu, "Diabatic visualization study of R245fa two phase flow pattern characteristics in horizontal smooth and microfin tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 152, p. 119513, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119513>
- [17] J. Diehl de Oliveira, J. Biancon Copetti, and J. C. Passos, "An experimental investigation on flow boiling heat transfer of R-600a in a horizontal small tube," *International Journal of Refrigeration*, vol. 72, pp. 97–110, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.08.001>
- [18] M. Nasr, M. Akhavan-Behabadi, M. Momenifar, and P. Hanafizadeh, "Heat transfer characteristic of r-600a during flow boiling inside horizontal plain tube," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp. 93–99, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.024>
- [19] Z. Wang, P. Guo, H. Zhang, W. Yang, and S. Mei, "Comprehensive review on the development of sahph for domestic hot water," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 871–881, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.127>
- [20] D. Zhang, Q. Wu, J. Li, and X. Kong, "Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 522–528, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.077>
- [21] G.-H. Shi, L. Aye, D. Li, and X.-J. Du, "Recent advances in direct expansion solar assisted heat pump systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 349–366, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.044>
- [22] X. Kong, P. Sun, Y. Li, K. Jiang, and S. Dong, "Experimental studies of a variable capacity direct-expansion solar-assisted heat pump water heater in autumn and winter conditions," *Solar Energy*, vol. 170, pp. 352–357, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.081>
- [23] W. Quitiaquez, I. Simbaña, R. Caizatoa, C. Isaza, C. Nieto, P. Quitiaquez, and F. Toapanta, "Análisis del rendimiento termodinámico de una bomba de calor asistida por energía solar utilizando un condensador con recirculación," *Revista Técnica Energía*, vol. 16, no. 2, pp. 111–125, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.358>
- [24] G. K. Singh, S. Pradhan, and V. Tanna, "Experimental studies of two phase flow characteristics and void fraction predictions in steady state horizontal two-phase nitrogen flow," *Cryogenics*, vol. 100, pp. 77–84, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.04.007>
- [25] C.-M. Yang and P. Hrnjak, "A new flow pattern map for flow boiling of R410a in horizontal micro-fin tubes considering the effect of the helix angle," *International Journal of Refrigeration*, vol. 109, pp. 154–160, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.013>
- [26] M. Shafaei, H. Mashouf, A. Sarmadian, and S. Mohseni, "Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-600a in horizontal smooth and helically dimpled tubes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 107, pp. 28–36, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.148>

- [27] Z.-Q. Yang, G.-F. Chen, X.-R. Zhuang, Q.-L. Song, Z. Deng, J. Shen, and M.-Q. Gong, “A new flow pattern map for flow boiling of R1234ze(E) in a horizontal tube,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 98, pp. 24–35, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.08.015>
- [28] L. Wojtan, T. Ursenbacher, and J. R. Thome, “Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part II—Development of a new heat transfer model for stratified-wavy, dryout and mist flow regimes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 14, pp. 2970–2985, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.013>
- [29] J. D. de Oliveira, J. C. Passos, J. B. Copetti, and C. van der Geld, “Flow boiling heat transfer of propane in 1.0 mm tube,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 96, pp. 243–256, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.03.010>

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 (*double-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 Analytics, 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). Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista INGENIUS publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (*state-of-the-art*).

- **Investigaciones:** 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/xB0wE1>>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <<https://goo.gl/4xxjuo>>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:

<revistaingenius@ups.edu.ec>,
 <jcalles@ups.edu.ec> ó
 <mquinde@ups.edu.ec>.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y

Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o L^AT_EX(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para L^AT_EX en: <<https://goo.gl/Mwv8IC>>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia 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 firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <<https://goo.gl/XAc9a3>>.

3.1.2. Manuscrito

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatura más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.
6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la

investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.
11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

- [1] J. Riess, J. J. Abbas, "Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation". IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/7333.948462>

Libros:

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics" in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw–Hill, 1964, pp. 15–64.

Reportes Técnicos:

- [1] M. A. Brusberg and E. N. Clark, "Installation, operation, and data evaluation of an oblique–incidence ionosphere sounder system," in "Radio Propagation Characteristics of the Washington–Honolulu Path," Stanford Res. Inst., Stanford, CA, Contract NOBSR–87615, Final Rep., Feb. 1995, vol. 1

Artículos presentados en conferencias (No publicados):

- [1] Vázquez, Rolando, Presentación curso "Realidad Virtual". National Instruments. Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Publicados):

- [1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Ta-

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:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y

negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, si el envío se lo realiza en formato Word, se deberá 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 ar-

chivo 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
- Debe estar en el formato de la revista INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

La comprobación antes descrita puede llevar hasta 4 semanas.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones soli-

citadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
 - Publicable
 - Publicable con cambios sugeridos
 - Publicable con cambios obligatorios
 - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1° de enero y el 1° de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para

el envío de los artículos y su correspondiente publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la

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

Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:

Secretaría Técnica de Comunicación

Universidad Politécnica Salesiana

Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja

Casilla postal 2074

Cuenca, Ecuador

Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182

Fax: (+593 7) 408 89 58

Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec

www.ups.edu.ec

Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,
publicación semestral, N.º 26, julio/diciembre 2021

John Calle Sigüencia, PhD, Editor Jefe

revistaingenius@ups.edu.ec

Impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.

Teléfono: (+593 7) 283 17 45

Cuenca – Ecuador

Correo electrónico: centrograficosalesiano@lms.com.ec

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.

UTOPIA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

