

Número: 21

Redalyc 3.0

ESCI Web of science.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN : 1390-650X

eISSN : 1390-860X

enero/ junio 2019

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Deposición de capas funcionales sobre esmaltes cerámicos mediante la técnica sol-gel (revisión).

Pag. 9

- Aplicación de una red neuronal feed-forward backpropagation para el diagnóstico de fallas mecánicas en motores de encendido provocado

Pag. 32

- Estimación empírica del pretensado de una banda trapezoidal mediante el deslizamiento de las poleas

Pag. 63

- Análisis del electrolito del acumulador automotriz a diferentes temperaturas en condición de encendido

Pag. 88

INGENIUS

INGENIUS • Número 21 • enero/junio 2019. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Industrial.

Consejo de Editores

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

JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, MSC, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Responsable.

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

Consejo Científico

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

ELENA FORTUNATI, PHD, Universidad de Perugia, Italia.

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

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

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

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

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

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

GROVER ZURITA, PHD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

JOHN MORALES GARCÍA, 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.

FILIFE 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.

FILIFE SAMUEL, PEREIRA DA SILVA, PHD, Universidad de Minho, Portugal.

CÉSAR SEQUEIRA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PHD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PHD, Universidad de Piura, Perú.

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

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

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

PAOLO BELLAVISTA, PHD, Universidad de Bologna, Italia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Consejo de Revisores

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

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

ANDRÉS TELLO, MSC, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

VICTOR SAQUICELA, PHD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

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

RICARDO CAYSSIALS, PHD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

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

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

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

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

ALFONSO ZOZAYA, PHD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

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

LUIS MEDINA, PHD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

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

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

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

RAFAEL SOTELO, PHD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

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

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

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

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

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

GERMÁN ZAPATA, PHD, Universidad Nacio-

nal de Colombia, Colombia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

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

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

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

EDUARDO 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 Milán, Italia.

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

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

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

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

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

PABLO AREVALO, PHD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

ROBERTO GAMBOA, PHD, Universidad de Lisboa, Portugal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ARTEMIS MARTI CESCHIN, PHD, Universidade de Brasilia, Brasil.

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

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

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

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

JORGE BERNARDINO, PHD, Universidad de Coimbra, Portugal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CARLOS MAURICIO CARRILLO 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, MSc, 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, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

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

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

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

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

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

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

FABIO OBANDO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

JORGE ROMERO CONTRERAS, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

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

LUISA SALAZAR GIL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

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

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

JULIO VERDUGO, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARY VERGARA PAREDES, PhD, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela

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

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

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

Consejo de publicaciones

JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PHD
JUAN BOTASSO BOETI, SDB, PHD
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, MSC
LUIS ÁLVAREZ RODAS, PHD
FABRICIO FREIRE, MSC
JOSÉ JUNCOSA BLANCO, MSC
JAIME PADILLA VERDUGO, MSC
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PHD
SHEILA SERRANO VICENTI, MSC
JOHN CALLE SIGÜENCIA, MSC
RENÉ UNDA LARA, MSC
BETTY RODAS SOTO, MSC
ANDREA DE SANTIS, MSC
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSC

Editor General

LUIS ÁLVAREZ-RODAS, PHD

Consejo Técnico

DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSC, Diagramación y Maquetación
LCDA. ESTHEFANIA SARANGO COELLO
ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PHD

Servicio de Publicaciones

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

Editorial

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

Traductor

ADRIANA CURIEL

Tiraje: 800 ejemplares

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 21, enero – junio 2019

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



INDUSTRIA 4.0: LA ERA DE LA DIGITALIZACIÓN, GENERACIÓN E INTEGRACIÓN DE CONOCIMIENTO INDUSTRIAL

Estimadas y estimados lectores:

Desde la primera Revolución industrial, los progresos tecnológicos han generado el crecimiento pronunciado de la productividad industrial, y en los años más recientes los avances en la comunicación móvil y en las tecnologías de la información, nos han colocado en el medio de una cuarta ola de desarrollo tecnológico, que ha propiciado la transformación digital de la industria: la industria conectada, o también llamada la Industria 4.0.

En esta nueva era, y más allá de la clásica concepción de los sistemas automatizados para la producción en serie, los sensores, las máquinas y los sistemas de información requieren estar conectados a lo largo de toda la cadena de valor, generando datos que deben transformarse en conocimiento, para lograr una industria inteligente centrada en el producto y el cliente.

Es por ello por lo que la mera conexión y generación de datos no es suficiente, la digitalización de la industria es solo un habilitador de otros procesos analíticos y de razonamiento. En este sentido, el paradigma de la Industria 4.0 es un enfoque interdisciplinario, donde áreas de conocimiento bastante recientes como Internet de las cosas, sistemas ciberfísicos, computación en la nube, realidad aumentada, analítica de datos, entre otras, interactúan con dominios más conocidos tales como Aprendizaje Automático, Arquitectura Empresarial, Integración y Arquitectura Empresarial y Tecnologías de Información y Comunicación, para conducirnos a una industria integrada, eficiente y flexible, que permita

la producción de bienes de alta calidad a costos reducidos.

Así pues, el desarrollo de la Industria 4.0 propone retos sobre cómo aplicar e implementar procesos requeridos a lo largo de la cadena de valor, con base en el contexto y requerimiento de cada industria y ofrece oportunidades para alcanzar una manufactura sostenible en diferentes áreas del proceso productivo: en los modelos de negocios, redes de creación de valor, en el modelo de la organización, en los recursos humanos, así como también en los procesos y productos.

Estos retos y oportunidades deben entenderse en cada contexto, lo que permite incluso que pequeñas y medianas industrias puedan empezar a transitar el camino hacia la Industria 4.0. Desde el punto de vista de los resultados académicos, de acuerdo con Muhuri et al. (2019), en su artículo titulado *Industry 4.0: A Bibliometric Analysis and Detailed Overview* publicado en la revista *Engineering Applications of Artificial Intelligence*¹, las publicaciones y análisis de citas en torno al tópico Industry 4.0 en los repositorios Web of Science y Scopus, es bastante reciente, remontando al año 2012 la aparición del primer artículo académico; hasta el año 2017 ya se habían reportado 194 artículos en Web of Science y 1425 artículos in Scopus, con un crecimiento exponencial en el número de citas respecto al número de publicaciones. Así pues, las nuevas propuestas para hacer frente a los retos planteados por la Industria 4.0 están esperando por todos los que podamos aportar un grano de arena en este vasto dominio de conocimientos.

Mariela Cerrada Lozada, Ph. D.
Miembro del Consejo Científico

¹Pranab K. Muhuri, Amit K. Shukla, Ajith Abraham, "Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 78, pp. 218-235, Feb. 2019.

ÍNDICE

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Deposición de capas funcionales sobre esmaltes cerámicos mediante la técnica sol-gel (revisión)** 9
Functionalized enamel of ceramic tiles by sol gel technique (review)
Santiago Betancourt-Parra, Manuel A. Domínguez-Ortiz, Diana M. Mosquera-Palacio, Juliana Herrera-Guerra, Carlos M. Ríos-Rendón, Carlos E. Villa

ARTÍCULO CIENTÍFICO

- Simulación fotovoltaica considerando parámetros de integración en edificaciones** 21
Photovoltaic simulation considering building integration parameters
Ismael F. Izquierdo-Torres, Mario G. Pacheco-Portilla, Luis G. González-Morales, Esteban F. Zalamea-León
- Aplicación de una red neuronal feed-forward backpropagation para el diagnóstico de fallas mecánicas en motores de encendido provocado** 32
Application of feed-forward backpropagation neural network for the diagnosis of mechanical failures in engines provoked ignition
Wilmer Contreras Urgilés, José Maldonado Ortega, Rogelio León Japa
- Análisis termodinámico de un chiller de absorción de 1 y 2 etapas de una planta de cogeneración** 41
Thermodynamic analysis of one and two stages absorption chiller powered by a cogeneration plant
Hugo F. Zúñiga-Puebla, E.C. Vallejo-Coral, José Ramón Vega Galaz
- Nexo agua – energía: Análisis del flujo hídrico del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair** 58
The water-energy nexus: Analysis of the water flow of the Coca Codo Sinclair Hydroelectric Project
Sebastián Jiménez-Mendoza, Francisco Terneus-Páez
- Estimación empírica del pretensado de una banda trapezoidal mediante el deslizamiento de las poleas** 63
Empirical Estimation of the Prestressed of a V-Belt Through the Slip of the Pulleys
Eduardo Hernández-Dávila, Luis Cacuangó-Eugenio, Verónica López-Pérez, Julio Cajamarca-Villa
- Análisis y comparación de ISDB-T utilizando modulaciones OFDM y CC-OFDCM** .. 71
Analysis and comparison of ISDB-T using modulations OFDM and CC-OFDCM
José Gómez, Holger Lapo, Luis Oñate
- Migración hacia NGN en la provincia Granma**..... 78
Migration to NGN in the Granma province
Randy Verdecia Peña
- Análisis del electrolito del acumulador automotriz a diferentes temperaturas en condición de encendido** 88
Analysis of the electrolyte of an automotive accumulator for different temperatures in starting condition
Johnny Pancha^{1,*}, Vicente Rojas, Vicente Romero, Jorge Nejer
- Normas editoriales** 95
Guidelines



DEPOSICIÓN DE CAPAS FUNCIONALES SOBRE ESMALTES CERÁMICOS MEDIANTE LA TÉCNICA SOL-GEL (REVISIÓN)

FUNCTIONALIZED ENAMEL OF CERAMIC TILES BY SOL GEL TECHNIQUE (REVIEW)

Santiago Betancourt-Parra^{1,*}, Manuel A. Domínguez-Ortiz¹, Diana M. Mosquera-Palacio¹, Juliana Herrera-Guerra¹, Carlos M. Ríos-Rendón²,
 Carlos E. Villa³

Resumen

La funcionalización de esmaltes para la industria de las baldosas cerámicas ha sido un frente de investigación importante en los últimos 15 años. Diferentes investigadores han centrado sus esfuerzos en conseguir superficies con atributos funcionales que incrementen el valor agregado del producto y a su vez aporten respuestas a las necesidades tecnológicas de nuestros tiempos. El presente artículo se concentra en hacer una revisión de la literatura científica dedicada a la obtención de superficies funcionales por medio de la técnica de sol-gel, la cual es apta para la fabricación de soluciones que se depositan formando capas finas sobre los esmaltes de cerámica tradicional con el fin de aportar características funcionales al mismo. El documento presenta las principales soluciones alcóxicas usualmente empleadas, las diferentes técnicas de deposición haciendo énfasis en los hallazgos experimentales obtenidos por los diferentes autores, y presenta una síntesis de los efectos funcionales hasta la fecha obtenidos por medio de la técnica.

Palabras clave: Esmaltes cerámicos, esmaltes funcionales, sol-gel, cerámica.

Abstract

Functionalized enamels for the ceramic tile industry has been a research topic since the past 15 years. Different researchers have focused their efforts on achieving surfaces with functional attributes that increase product value and provide technical solutions for the technological needs of our times. This article presents a review of the scientific literature dedicated to obtaining functional surfaces by means of a sol gel technique, that provides a means for deposition and formation of thin layers on traditional ceramic enamels in order to provide functional characteristics. The document presents: typical used alcoxidic solutions, the different deposition techniques emphasizing the experimental findings obtained by the authors, and presents a synthesis of the functional effects obtained by means of the technique.

Keywords: Ceramic enamel, Functional enamel, sol gel, ceramic.

^{1,*}Grupo de Investigaciones sobre Nuevos Materiales (GINUMA), Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Colombia. Autor para correspondencia ✉: santiago.betancourt@upb.edu.co <http://orcid.org/0000-0003-4474-2447>, <http://orcid.org/0000-0003-2167-7400>, <http://orcid.org/0000-0003-0401-3557>, <http://orcid.org/0000-0002-5636-7210>

²Dirección de desarrollo de producto, Eurocerámica, Colombia, <http://orcid.org/0000-0001-6816-4296>

³Dirección técnica de planta, SENCO, Colombia, <http://orcid.org/0000-0002-4971-689X>

Recibido: 16-11-2018, aprobado tras revisión: 13-12-2018

Forma sugerida de citación: Betancourt-Parra, S.; Domínguez-Ortiz, M. A.; Mosquera-Palacio, D. M.; Herrera-Guerra, J.; Ríos-Rendón, C. M. y Villa, C. E. (2019). «Deposición de capas funcionales sobre esmaltes cerámicos mediante la técnica sol-gel (revisión)». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 9-20. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.01>.

1. Introducción

El esmalte cerámico es la capa de naturaleza vítrea que se deposita sobre la superficie de diferentes sustratos, generalmente también de naturaleza cerámica, para proporcionar atributos estéticos y proteger la superficie gracias a sus propiedades físicas. Un campo amplio de aplicación de los esmaltes es en las baldosas cerámicas, usadas para pavimentos y revestimientos en el sector de la construcción [1, 2]. En tal caso, en las baldosas se pueden reconocer por tres capas claramente definidas, ver Figura 1, que son: i) la pasta, que es la encargada de servir de soporte, es la que tiene el mayor espesor y cuerpo en la baldosa, ii) el engobe que es un revoque de arcilla que posibilita la unión entre el esmalte y la pasta, aproximadamente 100 a 200 μm , iii) el esmalte, el cual es una capa de muy baja porosidad, de aproximadamente 75 a 300 μm con las características mencionadas [3].

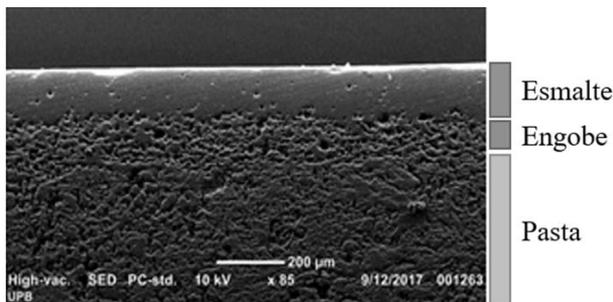


Figura 1. Corte en sección transversal de una baldosa cerámica.

Además de aportar características estéticas decorativas, los esmaltes de dichas baldosas pueden ser usados para otras posibilidades funcionales. Entre las funcionalidades que se les desea mejorar a las superficies se encuentran características tales como: autolimpiantes, almacenadoras de energía, fotocatalíticas, antibacterianos, fungicidas, alta resistencia al rayado, inhibidoras de la formación de hielo, que absorben o emiten sustancias, superficies luminiscentes y hasta recubrimientos que puedan cambiar propiedades bajo el efecto de un estímulo [4]. No obstante, muchos de los parámetros necesarios para conseguir una aplicación a escala industrial no son lo suficientemente estables, y aún se encuentran en investigación [5]. Siendo para la industria cerámica todo un reto, dado que la incorporación de nuevas tecnologías, trae consigo adecuaciones en los ciclos de producción y las condiciones rutinarias de fabricación que se traducen en altas inversiones económicas.

A nuestro entendimiento, existen varias técnicas para proporcionar los atributos funcionales a los esmaltes entre las que se encuentran: i) la modificación de la composición del esmalte mediante la incorporación de sustancias en la mezcla del esmalte antes de

quemar, ii) la modificación física de la superficie usando plasma o medios de deposición química en fase vapor, iii) la deposición química de soluciones líquidas, siendo la técnica de sol-gel una de las más representativas de esta familia.

La técnica de síntesis de materiales por medio de sol-gel ha sido ampliamente descrita como una técnica probada para la obtención de materiales vítreos y cerámicos [6–10]. Mediante reacciones de hidrólisis y condensación que ocurren en procesos químicos húmedos, se consiguen transformaciones moleculares de las sustancias precursoras en redes de óxidos [11].

La siguiente revisión se centra específicamente en compilar información científica relacionada con la deposición de soluciones químicas por medio de la técnica de sol-gel en esmaltes vítreos de baldosas cerámicas con el fin de incrementar propiedades o aportar atributos funcionales a la superficie esmaltada. En la Figura 2 se realiza un reporte gráfico de la evolución de publicaciones por año realizadas sobre el tema en bases de datos científicas *online* y libros especializados citados en la literatura consultada, entre las que se encuentran Google Scholar, Science Direct, Wiley Online Library, Springer Link, Repositorio Institucional UN, American Institute of Physics, Taylor & Francis Online, ACS Publications.

La revisión se realizó para el período comprendido entre el año 2000 y 2017. Siendo el período 2009-2017 el de mayor número de publicaciones acerca del tema. En este reporte, primero, se concentra en presentar los diferentes tipos de soluciones alcóxicas usualmente empleadas. Luego, se enfoca en una descripción de las diferentes técnicas de deposición haciendo énfasis en los hallazgos experimentales obtenidos por los diferentes autores. Finaliza, presentando una síntesis de los efectos funcionales.

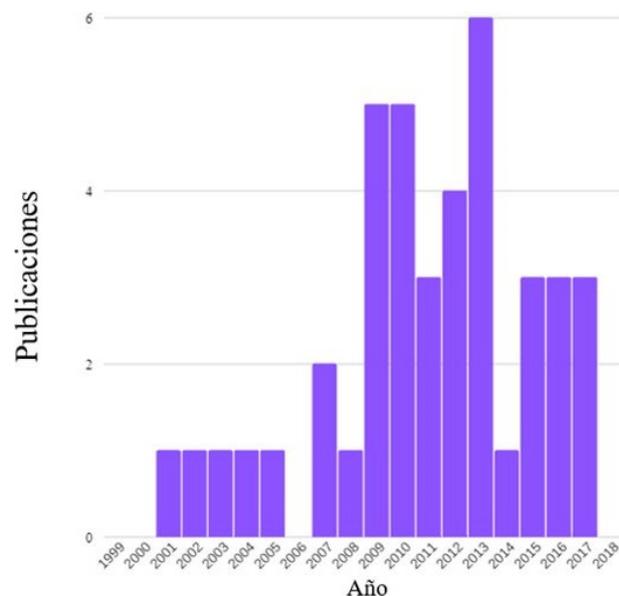


Figura 2. Relación de publicaciones por año.

2. Precursores

En la Tabla 1 se presentan las soluciones químicas precursoras comúnmente empleadas para hacer recubrimientos sobre esmaltes mediante la técnica de sol-gel y sus correspondientes estructuras. Los precursores (reactivos de partida) son un alcóxido de fórmula química típica R-O-M, los cuales son compuestos que presentan un ion metálico (u otro catión) representado por la letra M, una molécula de oxígeno representada por la letra O y un grupo alquilo R. Las reacciones generales se expresan en la Tabla 2 acorde con lo indicado en [12].

Tabla 1. Soluciones químicas precursoras

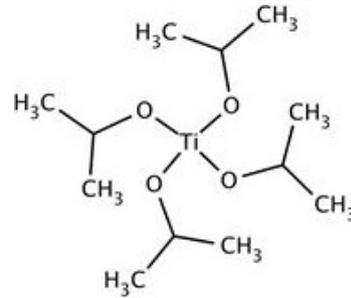
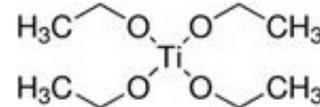
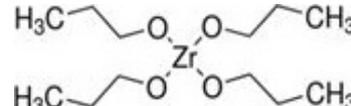
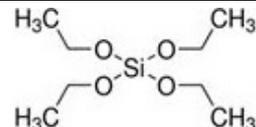
Nombre	Formula molecular
Isopropóxido de titanio	
Etóxido de titanio	
Propóxido de circonio	
Tetra-etil-ortosilicato	

Tabla 2. Reacciones generales proceso sol-gel

Hidrólisis
$M-(OR)_x + H-O-H \rightarrow HO-M(OR)_{x-1} + H-OR$
Condensación
<i>Alcoholación</i>
$(OR)_{x-1} -M-OH + RO-Me-(OR)_{x-1} \rightarrow (RO)_{x-1} -Me-O-M-(OR)_{x-1} + ROH$
<i>Oxalación</i>
$(RO)_{x-1} -M-OH + HO-M-(OR)_{x-1} \rightarrow (RO)_{x-1} -M-O-M-(OR)_{x-1} + HOH$
<i>Convenciones:</i>
M: Si, Ti, Zr, Hf, Ta, Nb, Al, Zn, etc.
R: CH ₃ , C ₂ H ₅ , C ₃ H ₇ , etc.

Una vez reaccionan, los precursores forman coloides, los cuales son una suspensión, en la que la fase dispersada es pequeña (1-1000 nm), las fuerzas gravitacionales son despreciables y las interacciones son dominadas por fuerzas de corto rango (las fuerzas de atracción de Van der Waals y las cargas superficiales). El sol es una suspensión coloidal de partículas sólidas dentro de un líquido.

El punto de gel es el momento en cual las partículas enlazadas de óxido se extienden por el recipiente que contiene el coloide. Durante la gelación, la viscosidad se incrementa hasta alcanzar a formar un sólido que adapta la forma del molde. En este punto, el líquido del poro está constituido principalmente de alcohol y agua, y el coloide se convierte en alcogel, el cual puede ser removido del recipiente y puede sostenerse por sí mismo [13].

En la Figura 3, se muestra una representación esquemática elaborada por [6]. Los aerogeles por su lado se obtienen cuando el poro que está lleno de líquido es reemplazado por aire sin alterar la estructura o el volumen del cuerpo del gel.

Las reacciones en el proceso sol-gel dependen de varios parámetros, por ejemplo:

- Composición y concentración de los precursores (alcóxido y solvente)
- Cantidad de agua adicionada
- Tipo y concentración del catalizador usado
- Aditivos adicionales como desecantes
- Secuencia en la cual los componentes son adicionados
- Tiempo de mezcla
- Tiempo de añejamiento
- Condiciones de mezclado (eficiencia de la mezcla, agitación por ultrasonido, atmósfera)
- Temperatura.

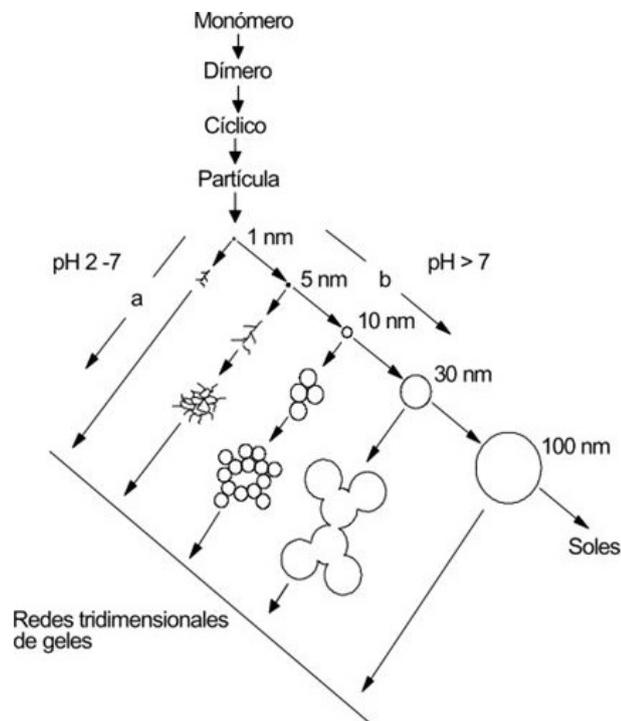


Figura 3. Representación esquemática del proceso sol-gel, tomado de [6].

3. Técnicas de deposición

En relación con las técnicas de deposición, a continuación, se presentan los hallazgos resaltados en la información estudiada, que se complementan con la información presentada en la Tabla 3 en la que se resumen características de las técnicas reportadas.

3.1. Rotacional (*Spin*)

Esta técnica basa su funcionamiento en la deposición de pequeñas cantidades de solución en la superficie de un sustrato, mientras este gira a alta velocidad, de forma tal que la solución se dispersa por acción de la fuerza centrífuga, formando una película líquida homogénea. La solución evapora rápidamente el solvente y las moléculas del óxido se depositan sobre el sustrato. El espesor de la película es una función que depende directamente de las variables: velocidad de rotación, la viscosidad, el contenido de solvente y sus propiedades al evaporarse.

Existen varios modelos matemáticos para la variación del espesor descritos ampliamente en [12–17]. Con esta técnica se pueden obtener recubrimientos de capa delgada con espesor entre 0,1 y 10 μm [18].

Es ampliamente usada en aplicaciones donde se requiera la formación de películas uniformes, es decir, con espesores homogéneos y de baja rugosidad [19]. Por esta razón, se emplea en la fabricación de microcomponentes electrónicos y ha resultado de interés para la obtención de altos brillos en los esmaltes de

las baldosas dado que al reducir la rugosidad de la superficie aumenta el brillo de la misma [2].

3.2. Inmersión (*Dip*)

La técnica de deposición por inmersión (o en inglés *Dip coating*) basa su procedimiento en la inmersión total del sustrato en la solución, para luego ser removido a una velocidad controlada [20, 21], bajo condiciones ambientales. Acorde con algunos investigadores es considerada como la técnica más fácil para depositar películas en la superficie de un sustrato, los cuales pueden ser tanto planos como curvos [11]. Incluso afirman que puede ser implementada para superficies con áreas en ordenes de metros cuadrados.

El espesor de la película depende directamente de la velocidad de retracción del sustrato y la viscosidad de la solución, siendo bajas velocidades las apropiadas para obtener películas delgadas de espesor aproximado entre 0,3 y 3 μm , y rugosidad entre 60 y 690 nm [18].

En el año 2007, Kuisma *et al.* [22], estudiaron la capacidad de limpieza de películas delgadas de ZrO_2 y TiO_2 depositadas por inmersión sobre superficies de baldosas cerámicas esmaltadas de 3,0 x 3,0 cm; investigación que mostró por medio de mediciones topográficas, que cuanto más áspero era el esmalte cerámico, más material orgánico se adhería en la superficie.

Por su parte, en el año 2009, fueron caracterizados los efectos de resistencia al ataque químico (manchado) y limpieza de dos baldosas con esmalte mate y una con esmalte brillante depositadas por el método de inmersión con películas de TiO_2 y ZrO_2 [23]; determinando que la eficiencia del recubrimiento de TiO_2 , que tiene una mayor capacidad de limpieza y autolimpieza después de haber sido expuesta a la luz UV. Los autores indican que la capacidad de limpieza de las superficies vidriadas brillantes no fue pronunciada, y que los recubrimientos de circonio podrían afectar negativamente la capacidad de autolimpieza de los esmaltes.

Hofer *et al.* [24] estudiaron la estabilidad térmica y la propiedad fotocatalítica activa del titanio al ser depositado sobre superficies cerámicas (sustratos esmaltados y sustratos de corindón no esmaltados) con área recubierta de 2,5 x 4,0 cm utilizando un proceso por inmersión. encontrando que la reducción de la estabilidad térmica depende de la composición del sustrato y evidenciando una ligera modificación de la estructura electrónica del titanio, lo que indicó interacciones débiles entre la sílice y el titanio.

Similares resultados fueron reportados en el estudio de recubrimientos de baldosas cerámicas y vidrio de ventanas con películas delgadas de nano TiO_2 utilizando técnicas de aplicación por dip y spray, demostrando un buen rendimiento de los recubrimientos para efectos de autolimpieza [25].

Adicional a ello, se ha usado para lograr efectos antibacterianos sobre sustratos vítreos de baldosas

cerámicas empleando soluciones de Ag/SiO₂ [26] depositadas sobre la superficie esmaltada de las baldosas contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* utilizando una técnica de recubrimiento por inmersión. Ellos encontraron un excelente rendimiento antibacteriano contra los dos tipos de bacterias, relacionado con la alta temperatura de sinterización de la capa depositada, ya que, después de este tratamiento los iones de plata se liberan constantemente, lo que genera cambios en las concentraciones de estos iones e inhiben el desarrollo de estas bacterias.

Soares *et al.* [27] utilizaron la técnica sol-gel para la producción de recubrimientos gruesos de partículas coloides de sílice y sílice/circonio sobre sustratos vitrocerámicos del sistema Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ con el fin de mejorar su resistencia al rayado y al desgaste. La deposición se realizó a una velocidad de extracción de 5 cm/min. Al comparar los resultados obtenidos con las propiedades del sustrato sin recubrir, se encontró una mejora en el aspecto final de la superficie para los recubrimientos funcionales; aunque, la resistencia al desgaste se mantuvo constante en comparación con las muestras sin recubrir.

Además, Zhang *et al.* [28] investigaron los efectos de la incorporación de nano partículas de titanio a soluciones de tetraetil ortosilicato (TEOS) depositadas sobre baldosas cerámicas vidriadas comerciales blancas (25 × 25 × 5 mm) mediante una técnica de recubrimiento por inmersión, en la cual se sumergieron los sustratos durante 3 minutos y luego se extrajeron a 1 mm/s. Esta investigación comprobó una mejor dispersión para las partículas de P25-TiO₂/TEOS, con mayor área superficial, mayor rugosidad de la superficie y un tamaño de partícula más pequeño en comparación con las partículas de P25-TiO₂, lo que generó una mejor hidrofiliidad y una mayor actividad fotocatalítica bajo irradiación de luz visible.

López *et al.* [29] examinaron el efecto de diferentes tipos de sustratos sobre la morfología de la superficie y la fotocatalisis de película de TiO₂ a gran escala. La impregnación se realizó mediante inmersión, específicamente, para el caso de los sustratos de vidrio de soda-cal esmerilado con ácido (12 × 21,5 cm) se depositó una capa de barrera de SiO₂ con una velocidad de extracción de 5 cm/min. Por su parte, los sustratos (12 × 21,5 cm) de vidrio sódico-cal glaseado con ácido, vidrio de sosa-cal glaseado con ácido previamente recubierto con una capa de barrera de SiO₂, baldosa cerámica esmaltada y una aleación de aluminio 6061, se impregnaron con una película de TiO₂. Estos ensayos permitieron determinar que la fase y la microestructura presente en la película de TiO₂ es exclusivamente anatasa; además de una variación sustancial del crecimiento de los cristales de TiO₂, la morfología y el espesor de la película con respecto al sustrato usado, lo que a su vez afecta la actividad fotocatalítica.

Los estudios realizados por Hazmaliza *et al.* [30] reportan el rendimiento antibacteriano de la anatasa mezclada con esmalte y aplicada sobre baldosas cerámicas, utilizando dos tamaños diferentes de polvo de anatasa (micrométrico y nano). Para la realización de esta experimentación, se varió la concentración en peso del polvo de anatasa en micras, mientras que la anatasa de tamaño nano se estableció en un valor fijo. Los resultados obtenidos visualizan el cambio ligero del color de la baldosa producida, que se torna más amarillenta cuando aumenta la composición de anatasa; asimismo, evidencian que las propiedades antibacterianas aumentan al tener mayor composición de anatasa nanométrica en comparación con la micrométrica, debido a la mayor superficie de los agentes antibacterianos en la baldosa. Igualmente, entre mayor sea la composición de los polvos de anatasa, mayor será la viscosidad del esmalte.

Cabe anotar que mediante esta técnica también se ha investigado la aplicación de recubrimientos autolimpiantes de TiO₂ sobre muestras de tejas de arcilla (1 × 1 × 0,8 cm) [31]. Los autores demostraron que un recubrimiento fotocatalítico de TiO₂, en la fase nanocrystalina anatasa, para película delgada (0,399 mg de suspensión / superficie de baldosa cm²), aplicada bajo condiciones industriales, tiene una mejor actividad fotocatalítica en la descomposición de azul de metileno, hidrofiliidad y actividad antimicrobiana que un recubrimiento fotocatalítico grueso (0,885 mg suspensión / cm²).

3.3. Aspersión (*Spray*)

Esta técnica de aplicación consiste en un proceso de aspersión o atomización vertical de una solución líquida estacionaria o en movimiento lineal, en donde un haz de fluido impulsado por aire comprimido se fragmenta en gotas dispersas que luego impactan sobre un sustrato. El *spray* tiene varias variables para su correcto funcionamiento, como son el caudal de la solución, la presión del aire comprimido, el tipo de boquilla y la distancia boquilla-sustrato, entre otras [32]. Dichas variables influyen en el tamaño, la forma, la velocidad y la fuerza de impacto de la gota; lo que también se encuentran ligadas a las propiedades del fluido (tensión superficial, densidad y viscosidad).

Después del impacto, se genera una transferencia de calor, entre el aire circundante y las gotas, que provoca la evaporación del solvente a través de la capa límite que rodea cada gota. Al finalizar la evaporación, las gotas se adhieren a la superficie vítrea creando un recubrimiento de capa delgada con espesor entre 0.1 y 3 μm [18].

Esta técnica de deposición no tiene limitación en el tamaño del sustrato pues el ángulo de abertura de la pistola de aplicación se regula. Requiere de poca cantidad de solución ya que su deposición se ejecuta

solo en la superficie esmaltada reduciendo costos a su vez y minimizando el impacto ambiental puesto que se hace innecesario el uso de vacío para eliminar los gases emergentes del proceso [33–35].

Bondioli *et al.* (2009) [36] estudiaron la funcionalización de las superficies de las baldosas cerámicas industriales mediante la técnica sol-gel para mejorar la capacidad de limpieza del gres porcelánico fino sin esmaltar, preparando recubrimientos de $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ con diferentes concentraciones de titanio que se depositaron mediante aerógrafo. En dicho trabajo reporta que las películas son transparentes, no modifican el brillo del gres y muestran una buena adhesión; además de obtener un mayor efecto fotocatalítico a altas temperaturas de sinterización, lo que genera una superficie cerámica autolimpiante y autoesterilizante que, además, podría degradar varios contaminantes orgánicos en el ambiente circundante.

Savvova *et al.* [37] desarrolló recubrimientos de TiO_2 sobre esmalte cerámico, determinando la multifuncionalidad de este material al reportar su propiedad antibacteriana y antimicótica sustanciales de 70 al 90 %. Nuevamente, Bondioli *et al.* [38,39] reportaron la funcionalización de las superficies de baldosas cerámicas, pero esta vez enfocado en sales solubles (procesos alternativos de coloración de materiales cerámicos sin esmaltar) para mejorar propiedades mecánicas (resistencia al rayado y al desgaste) y la conductividad.

Para ello, preparó soluciones con diferentes concentraciones de circonio, titanio y plata; de las cuales se aplicaron con aerógrafo 300 g/cm^2 sobre bizcochos en crudo verde. Se visualizó que la adición de sales solubles en circonio aumentó la resistencia al rayado, al tiempo que mantiene la apariencia estética final de las baldosas cerámicas. Los resultados encontrados para titanio y plata fueron semejantes a los ya mencionados para circonio, con la diferencia de la generación de una capa multifuncional.

3.4. Pantalla o serigrafía (*Screen*)

La serigrafía o impresión en pantalla permite la realización de diseños bidimensionales, lo que le da utilidad en procesos industriales [40]. Los procesos serigráficos requieren de tejido que puede ser fibra sintética o malla de acero tensionado y pegado en un marco, el cual se cubre con una emulsión que es impermeable a la solución de recubrimiento en el área donde no debe aparecer ninguna impresión.

Es una técnica que prácticamente no ocasiona pérdidas de la solución de recubrimiento durante la impresión, pues el bastidor recorre la pantalla a una velocidad constante y al realizar la aplicación retrocede

para repetir el procedimiento.

Debido a su versatilidad, este método ha sido utilizado desde hace 50 años en la industria cerámica para depositar esmaltes y decorar baldosas [18]. Para este tipo de sustratos, en procesos que generan capa delgada de TiO_2 por la técnica sol-gel, produce espesores de 5 a $35 \mu\text{m}$; teniendo en cuenta que tanto el espesor como la cantidad de material aplicado puede variar según el porcentaje de aplicación de la pantalla, que incluye el volumen entre los hilos de la pantalla y el espesor de la emulsión [40]. Ya que no se deposita todo el material en la pantalla, el espesor de la capa húmeda también depende de la fuerza y la velocidad de arrastre del bastidor, la distancia pantalla-sustrato, y la viscosidad de la solución depositada [40].

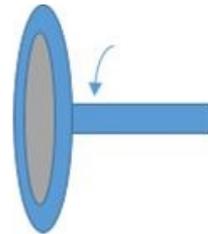
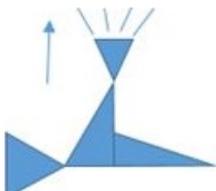
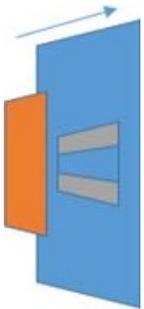
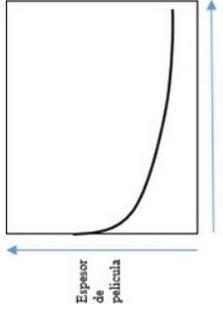
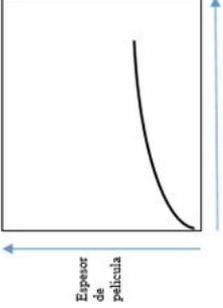
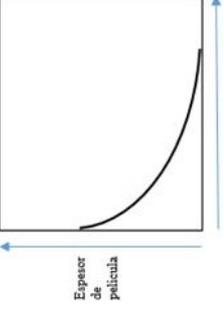
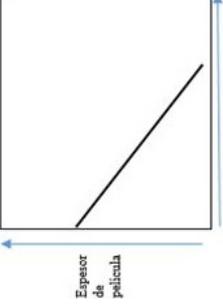
En el 2008, São Marcos *et al.* [41], estudiaron las capas de TiO_2 depositadas a 25 y 50 g/m^2 mediante serigrafía (tamizado 55 y $136 \mu\text{m}$) sobre baldosas monoporosas esmaltadas. Ellos determinaron que las capas otorgaban más del 90 % de eficiencia después de 6 a 8 h de realización de la decoloración de Orange II bajo luz artificial visible sin desactivación de la capa; obteniendo niveles de decoloración aceptables en periodos de tiempo razonables.

En el año siguiente, estos investigadores [42] caracterizaron y determinaron la degradación fotocatalítica del Orange II, para capas activas de ZnO depositadas a 25 y 50 g/m^2 mediante distintas pantallas tamizadas (55 y $136 \mu\text{m}$) utilizando baldosas monoporosas con esmalte brillante ($20 \times 10 \text{ cm}$ de Revigrés, PT); en este caso, los resultados revelaron un rendimiento de decoloración de Orange II considerable (más del 50 % de eficiencia después de 6 a 8 h, con un grado de atenuación máximo del 72 %), bajo luz visible artificial o por exposición directa a luz del sol. Por ello, las capas de TiO_2 y ZnO evitan la eliminación del fotocatalizador al final del proceso.

Para el mismo año, Rego *et al.* [43] utilizaron los dos materiales descritos para determinar la degradación fotocatalítica del colorante Orange II en soluciones acuosas, bajo exposición directa a la luz solar. Para ello, las capas de TiO_2 y ZnO se depositaron con 50 g/m^2 sobre baldosas cerámicas de esmalte monoporoso brillante comerciales ($20 \times 20 \text{ cm}$ de Revigrés, PT), mediante un proceso serigráfico donde se usaron pantallas tamizadas ($136 \mu\text{m}$).

Estas capas mostraron un rendimiento superior para el material TiO_2 ; además de un grado máximo de atenuación del color del 90 %. Por su parte, en el año 2011 Seabra *et al.* [44] al evaluar el comportamiento fotocatalítico de capas de titanio depositadas por spray y serigrafía, encontró una mejor cobertura con niveles de rugosidad bajos para el método de spray.

Tabla 3. Características y trabajos publicados según técnica de deposición

Técnica	SPIN	DIP	SPRAY	PANTALLA
Representación gráfica de la técnica				
Curva típica de comportamiento del espesor en función de las variables de proceso				
Rango de espesores	0,1-10 μm	0,3-3 μm	0,1-3 μm	5-55 μm
Antibacteriano		[26, 30]	[45-47]	
Fotocatálisis	[29]	[21-25, 28, 29, 31]	[25, 35, 36, 48-59]	[40-44, 48]
Resistencia al rayado		[27]	[36-39]	

4. Aplicaciones

En la Figura 4 se presenta el gráfico de distribución de las investigaciones estudiadas según la aplicación deseada. Claramente se encuentra que las aplicaciones asociadas a la fotocatalisis y el efecto antibacteriano han sido el principal foco de atención para esta clase de desarrollos investigativos. Menos del 10 % de estas investigaciones se han enfocado en incrementar la resistencia al rayado de las superficies. A continuación, se presentan una descripción breve de esta clase de aplicaciones.

4.1. Fotocatálisis

La absorción de fotones provenientes de la luz con suficiente energía (igual o superior a la banda energética del catalizador) promueve reacciones catalíticas en la superficie del material, generando excitones (pares $e^- - h^+$). Dichos excitones pueden aprovecharse para llevar a cabo reacciones redox [60].

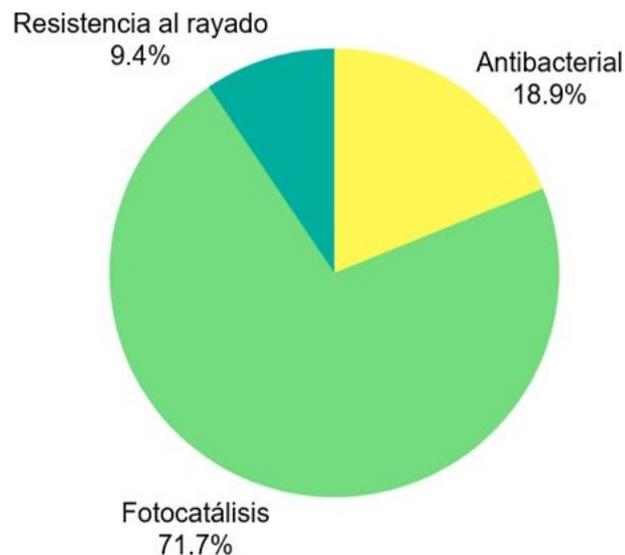


Figura 4. Distribución de investigaciones según aplicación.

El principal propósito de la obtención de recubrimientos con funciones catalíticas empleando titanio o variaciones de titanio en superficies cerámicas esmalgadas, es la autolimpieza tal y como es reportado en la revisión realizada por parte [18]. Esta característica es la combinación de dos fenómenos: la acción de catálisis sobre determinadas sustancias (CO_2 , COVs) y la superhidrofobicidad propia del titanio. Algunos autores también aseguran la posible eliminación de NO_x , CO, SO_x del aire [61, 62].

4.2. Antibacteriano

Uno de los efectos derivados de las interacciones entre radicales libres (iones y excitones) depositados en las superficies es la reducción significativa del crecimiento

de microorganismos. El mecanismo de reducción radica en el bloqueo de la actividad aeróbica del microorganismo por ausencia de oxígeno disponible en el medio.

Esta aplicación ha resultado de alto interés para sitios públicos altamente expuestos a condiciones de crecimiento de microorganismos, como son centros de salud (clínicas, hospitales, salas de cirugía), escuelas y colegios tal y como lo han propuesto [63].

4.3. Resistencia al rayado

Detrás del incremento de esta propiedad subyacen aspectos relacionados con el incremento en otras propiedades como son la vida útil de las superficies y de los atributos que en ella se encuentran, a saber: brillo, color, textura, dureza, entre otros, los cuales son afectados por el desgaste consecuencia de los fenómenos de fricción a los cuales están sometidos los productos cerámicos.

La posibilidad de formar capas cerámicas nano y micrométricas, con estructura cristalina en vez de la estructura amorfa propia de los esmaltes vítreos, ha demostrado incrementos notorios en la respuesta de la superficie en lo que se refiere a la resistencia al rayado [64].

5. Conclusiones

Luego de la revisión efectuada se encontró que la técnica de sol-gel ha sido empleada para la fabricación de soluciones que se depositan en capas finas sobre los esmaltes de cerámica tradicional con el fin de aportar características funcionales al mismo. Las publicaciones encontradas corresponden a investigadores ubicados en Italia, Brasil, Portugal, principalmente. Las superficies con atributos funcionales de fotocatalisis (autolimpieza) han sido un eje importante que ha motivado las investigaciones en esta área. Siendo el amplio mercado y el potencial efecto positivo elementos de innovación para la industria.

Aun cuando es un tema cuyos orígenes investigativos datan del año 2000 y encuentra un fuerte impulso entre los años 2007 en adelante, las investigaciones en otras funcionalidades parecen estar susceptibles de ser estudiadas dado que es posible recubrir los esmaltes con soluciones alcóxicas mediante la técnica de sol-gel.

Referencias

- [1] O. J. Restrepo Baena, *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: un mundo en permanente evolución*, C. E. F. de Minas, Ed. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/sSTprJ>

- [2] L. Fröberg and L. Hupa, "Topographic characterization of glazed surfaces," *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 6, pp. 1622–1629, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.07.173>
- [3] R. Casasola, J. M. Rincón, and M. Romero, "Glass-ceramic glazes for ceramic tiles: a review," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 2, pp. 553–582, Jan 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5981-y>
- [4] A. Moreno Berto, "Ceramic tiles: Above and beyond traditional applications," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, no. 2, pp. 1607–1613, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.146>
- [5] M. Raimondo, G. Guarini, C. Zanelli, F. Marani, L. Fossa, and M. Dondi, "Printing nano TiO_2 on large-sized building materials: Technologies, surface modifications and functional behaviour," *Ceramics International*, vol. 38, no. 6, pp. 4685–4693, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.02.051>
- [6] J. González Hernández, J. Pérez Robles, F. Ruiz, and J. Martínez, "Vidrios SiO_2 nanocompuestos preparados por sol-gel: revisión," *Superficies y vacío*, no. 11, pp. 1–16, 2000. [Online]. Available: <https://goo.gl/cVrCwj>
- [7] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, C. J. Brinker and G. W. Scherer, Eds. San Diego: Academic Press, 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057103-4.50007-6>
- [8] M. Guglielmi and G. Carturan, "Precursors for sol-gel preparations," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 100, no. 1, pp. 16–30, 1988. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(88\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0022-3093(88)90004-X)
- [9] J. Livage and D. Ganguli, "Sol-gel electrochromic coatings and devices: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 68, no. 3, pp. 365–381, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00369-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00369-X)
- [10] J. Livage, "Sol-gel processes," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 2, no. 2, pp. 132–138, 1997. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(97\)80057-5](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(97)80057-5)
- [11] L. Znaidi, "Sol-gel-deposited ZnO thin films: A review," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 174, no. 1, pp. 18–30, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.07.001>
- [12] D. Chen, "Anti-reflection (ar) coatings made by sol-gel processes: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 68, no. 3, pp. 313–336, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00365-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00365-2)
- [13] S. Attia, J. Wang, G. Wu, J. Shen, and J. Ma, "Review on sol-gel derived coatings: Process, techniques and optical applications," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 211–218, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-0302.2002.03.005>
- [14] D. Meyerhofer, "Characteristics of resist films produced by spinning," *Journal of Applied Physics*, vol. 49, no. 7, pp. 3993–3997, 1978. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.325357>
- [15] J. H. Lai, "An investigation of spin coating of electron resists," *Polymer Engineering & Science*, vol. 19, no. 15, pp. 1117–1121, 1979. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pen.760191509>
- [16] J. Martín-Márquez, J. M. Rincón, and M. Romero, "Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware tiles," *Ceramics International*, vol. 34, no. 8, pp. 1867–1873, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.06.006>
- [17] D. B. Hall, P. Underhill, and J. M. Torkelson, "Spin coating of thin and ultrathin polymer films," *Polymer Engineering & Science*, vol. 38, no. 12, pp. 2039–2045, 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pen.10373>
- [18] A. L. da Silva, M. Dondi, M. Raimondo, and D. Hotza, "Photocatalytic ceramic tiles: Challenges and technological solutions," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, no. 4, pp. 1002–1017, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.039>
- [19] C. A. Otálora Bastidas, "Desarrollo de materiales usados en la fabricación de celdas solares orgánicas," Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/4kKihE>
- [20] C. Terrier, J. Chatelon, R. Berjoan, and J. Roger, "Sb-doped SnO_2 transparent conducting oxide from the sol-gel dip-coating technique," *Thin Solid Films*, vol. 263, no. 1, pp. 37–41, 1995. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)06543-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06543-1)
- [21] S. Kato, S. Kato, H. Taoda, and S. Katoh, "Thin film coating of photocatalytics on ultra light ceramic tile by use of supercritical fluid," *High Pressure Research*, vol. 20, no.

- 1-6, pp. 415–419, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/08957950108206189>
- [22] R. Kuisma, L. Fröberg, H.-R. Kymäläinen, E. Pesonen-Leinonen, M. Piispanen, P. Melamies, M. Hautala, A.-M. Sjöberg, and L. Hupa, “Microstructure and cleanability of uncoated and fluoropolymer, zirconia and titania coated ceramic glazed surfaces,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, no. 1, pp. 101–108, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.02.035>
- [23] M. Piispanen, J. Määttä, S. Areva, A.-M. Sjöberg, M. Hupa, and L. Hupa, “Chemical resistance and cleaning properties of coated glazed surfaces,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, no. 10, pp. 1855–1860, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.007>
- [24] M. Hofer and D. Penner, “Thermally stable and photocatalytically active titania for ceramic surfaces,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, no. 15, pp. 2887–2896, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.07.016>
- [25] K. Murugan, R. Subasri, T. Rao, A. S. Gandhi, and B. Murty, “Synthesis, characterization and demonstration of self-cleaning tio₂ coatings on glass and glazed ceramic tiles,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 76, no. 12, pp. 1756–1760, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.05.012>
- [26] N. Baheiraei, F. Moztarzadeh, and M. Hedayati, “Preparation and antibacterial activity of ag/sio₂ thin film on glazed ceramic tiles by sol-gel method,” *Ceramics International*, vol. 38, no. 4, pp. 2921–2925, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.068>
- [27] V. Soares, P. Soares, O. Peitl, E. Zanotto, A. Durán, and Y. Castro, “Resistencia al desgaste de recubrimientos sol-gel de sio₂ y sio₂ - zro₂ sobre materiales vitrocerámicos obtenidos por sinterización,” *Boletín la Sociedad Española De Cerámica y Vidrio*, vol. 52, no. 5, pp. 225–230, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3989/cyv.272013>
- [28] P. Zhang, J. Tian, R. Xu, and G. Ma, “Hydrophilicity, photocatalytic activity and stability of tetraethyl orthosilicate modified tio₂ film on glazed ceramic surface,” *Applied Surface Science*, vol. 266, pp. 141–147, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.117>
- [29] L. Lopez, W. A. Daoud, D. Dutta, B. C. Panther, and T. W. Turney, “Effect of substrate on surface morphology and photocatalysis of large-scale tio₂ films,” *Applied Surface Science*, vol. 265, pp. 162–168, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.156>
- [30] M. Hasmaliza, H. Foo, and K. Mohd, “Anatase as antibacterial material in ceramic tiles,” *Procedia Chemistry*, vol. 19, pp. 828–834, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.109>
- [31] M. Hadnadjev, J. Ranogajec, S. Petrovic, S. Markov, V. Ducman, and R. Marinkovic-Neducin, “Design of self-cleaning tio₂ coating on clay roofing tiles,” *Philosophical Magazine*, vol. 90, no. 22, pp. 2989–3002, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14786431003767017>
- [32] B. Yu, D. Vak, J. Jo, S. Na, S. Kim, M. Kim, and D. Kim, “Factors to be considered in bulk heterojunction polymer solar cells fabricated by the spray process,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 6, pp. 1838–1846, Nov 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2042282>
- [33] F. Aziz and A. Ismail, “Spray coating methods for polymer solar cells fabrication: A review,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 39, pp. 416–425, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.019>
- [34] S. Colella, M. Mazzeo, G. Melcarne, S. Carallo, G. Ciccarella, and G. Gigli, “Spray coating fabrication of organic solar cells bypassing the limit of orthogonal solvents,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 20, p. 203307, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4807464>
- [35] C. Sciancalepore and F. Bondioli, “Durability of sio₂-tio₂ photocatalytic coatings on ceramic tiles,” *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 679–684, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/ijac.12240>
- [36] F. Bondioli, R. Taurino, and A. Ferrari, “Functionalization of ceramic tile surface by sol-gel technique,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 334, no. 2, pp. 195–201, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.02.054>
- [37] O. V. Savvova and L. L. Bragina, “Use of titanium dioxide for the development of antibacterial glass enamel coatings,” *Glass and Ceramics*, vol. 67, no. 5, pp. 184–186, Nov 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10717-010-9258-8>

- [38] F. Bondioli, T. Manfredini, M. Giorgi, and G. Vignali, "Functionalization of ceramic tile surface by soluble salts addition: Part i," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 1, pp. 11–16, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.08.012>
- [39] F. Bondioli, M. Dinelli, R. Giovanardi, and M. Giorgi, "Functionalization of ceramic tile surface by soluble salts addition: Part ii. titanium and silver addition," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 9, pp. 1873–1878, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.03.008>
- [40] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 4, pp. 394–412, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004>
- [41] P. S. Marcos, J. Marto, T. Trindade, and J. Labrincha, "Screen-printing osol-g₂ photocatalytic layers on glazed ceramic tiles," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 197, no. 2, pp. 125–131, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.12.017>
- [42] J. Marto, P. S. Marcos, T. Trindade, and J. Labrincha, "Photocatalytic decolouration of orange ii by zno active layers screen-printed on ceramic tiles," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 163, no. 1, pp. 36–42, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.056>
- [43] E. Rego, J. Marto, P. S. Marcos, and J. Labrincha, "Decolouration of orange ii solutions by tio₂ and zno active layers screen-printed on ceramic tiles under sunlight irradiation," *Applied Catalysis A: General*, vol. 355, no. 1, pp. 109–114, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.12.005>
- [44] M. Seabra, R. Pires, and J. Labrincha, "Ceramic tiles for photodegradation of orange ii solutions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 171, no. 2, pp. 692–702, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.028>
- [45] A. Ghafari-Nazari, F. Moztarzadeh, S. M. Rabiee, T. Rajabloo, M. Mozafari, and L. Tayebi, "Antibacterial activity of silver photodeposited nepheline thin film coatings," *Ceramics International*, vol. 38, no. 7, pp. 5445–5451, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.03.055>
- [46] M. Machida, K. Norimoto, and T. Kimura, "Antibacterial activity of photocatalytic titanium dioxide thin films with photodeposited silver on the surface of sanitary ware," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 88, no. 1, pp. 95–100, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00006.x>
- [47] J. Szczawiński, H. Tomaszewski, A. Jackowska-Tracz, and M. Szczawińska, "Survival of staphylococcus aureus exposed to uv radiation on the surface of ceramic tiles coated with tio₂," *Polish Journal of Veterinary Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 41–46, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/v10181-011-0006-y>
- [48] C. L. Bianchi, B. Sacchi, S. Capelli, C. Pirola, G. Cerrato, S. Morandi, and V. Capucci, "Micro-sized tio₂ as photoactive catalyst coated on industrial porcelain grès tiles to photodegrade drugs in water," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 21, pp. 20348–20353, Jul 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9066-6>
- [49] A. M. Buckley and M. Greenblatt, "The sol-gel preparation of silica gels," *Journal of Chemical Education*, vol. 71, no. 7, p. 599, 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ed071p599>
- [50] A. L. da Silva, M. Dondi, and D. Hotza, "Self-cleaning ceramic tiles coated with nb₂o₅-doped-tio₂ nanoparticles," *Ceramics International*, vol. 43, no. 15, pp. 11986–11991, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.049>
- [51] A. L. da Silva, D. N. Muche, S. Dey, D. Hotza, and R. H. Castro, "Photocatalytic nb₂o₅-doped tio₂ nanoparticles for glazed ceramic tiles," *Ceramics International*, vol. 42, no. 4, pp. 5113–5122, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.029>
- [52] S. Niederhäusern, M. Bondi, and F. Bondioli, "Self-cleaning and antibacteric ceramic tile surface," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 949–956, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2012.02801.x>
- [53] V. Ducman, V. Petrovič, and S. D. Škapin, "Photo-catalytic efficiency of laboratory made and commercially available ceramic building products," *Ceramics International*, vol. 39, no. 3, pp. 2981–2987, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.09.075>
- [54] S. Ke, X. Cheng, Q. Wang, Y. Wang, and Z. Pan, "Preparation of a photocatalytic tio₂/zntio₃ coating on glazed ceramic tiles," *Ceramics International*, vol. 40,

- no. 6, pp. 8891–8895, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.027>
- [55] V. Petrovič, V. Ducman, and S. D. Škapin, “Determination of the photocatalytic efficiency of TiO₂ coatings on ceramic tiles by monitoring the photodegradation of organic dyes,” *Ceramics International*, vol. 38, no. 2, pp. 1611–1616, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.09.050>
- [56] C. Sciancalepore and F. Bondioli, “Durability of sio₂-tio₂ photocatalytic coatings on ceramic tiles,” *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 679–684, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/ijac.12240>
- [57] P. Sooksaen, N. Saowaros, K. Ngamkaruhasereethorn, and A. Pringkasemchai, “Photocatalytic degradation study of titania sol-gel coated on commercial unglazed ceramic tiles,” *Key Engineering Materials*, vol. 751, pp. 819–824, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.751.819>
- [58] V. B. Tezza, M. Scarpato, L. F. S. Oliveira, and A. M. Bernardin, “Effect of firing temperature on the photocatalytic activity of anatase ceramic glazes,” *Powder Technology*, vol. 276, pp. 60–65, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.076>
- [59] R. Taurino, L. Barbieri, and F. Bondioli, “Surface properties of new green building material after tio₂sio₂ coatings deposition,” *Ceramics International*, vol. 42, no. 4, pp. 4866–4874, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.002>
- [60] M. Nevárez-Martínez, P. Espinoza-Montero, F. Quiroz-Chávez, and B. Ohtani, “Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del tio₂,” *Avances en Química*, vol. 12, no. 2–3, pp. 45–59, 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/FtiWUw>
- [61] L. Liao, S. Heylen, S. P. Sree, B. Vallaey, M. Keulemans, S. Lenaerts, M. B. Roeffaers, and J. A. Martens, “Photocatalysis assisted simultaneous carbon oxidation and no_x reduction,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 202, pp. 381–387, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.09.042>
- [62] Y. Boyjoo, H. Sun, J. Liu, V. K. Pareek, and S. Wang, “A review on photocatalysis for air treatment: From catalyst development to reactor design,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 310, pp. 537–559, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.090>
- [63] S. Q. Sun, B. Sun, W. Zhang, and D. Wang, “Preparation and antibacterial activity of ag-tio₂ composite film by liquid phase deposition (lpd) method,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 31, no. 1, pp. 61–66, Feb 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0011-7>
- [64] F. Tana, M. Messori, D. Contini, A. Cigada, T. Valente, F. Variola, L. D. Nardo, and F. Bondioli, “Synthesis and characterization of scratch-resistant hybrid coatings based on non-hydrolytic sol-gel zro₂ nanoparticles,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 103, pp. 60–68, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.11.022>



SIMULACIÓN FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO PARÁMETROS DE INTEGRACIÓN EN EDIFICACIONES

PHOTOVOLTAIC SIMULATION CONSIDERING BUILDING INTEGRATION PARAMETERS

Ismael F. Izquierdo-Torres^{1,*}, Mario G. Pacheco-Portilla¹,
Luis G. González-Morales², Esteban F. Zalamea-León³

Resumen

Esta investigación calibra y valida un modelo de sistemas fotovoltaicos monocristalinos en la herramienta computacional System Advisor Model (SAM) para simulación de generación eléctrica, considerando las características meteorológicas en Cuenca (Ecuador), ciudad en altura próxima a la línea ecuatorial. Se obtiene el rendimiento eléctrico al desplegarse paneles fotovoltaicos de características específicas, con inclinaciones que responden a techumbres típicas locales y distintas orientaciones. Se calcula la eficiencia con mediciones *in situ* durante un período de 18 días, para que, con datos meteorológicos se calibre un archivo climático para el año 2016. Se estiman rendimientos anuales acorde a inclinación y orientación, y a características técnicas de los fotovoltaicos. Se detectan pérdidas por acumulación de suciedad e incremento de temperatura de las placas. Se valida el modelo mediante una regresión lineal, al comparar los valores simulados con los datos obtenidos de mediciones *in situ* de un panel en posición horizontal. Los resultados indican una pérdida promedio de eficiencia de 2,77 % por condiciones de suciedad y de hasta el 30 % por incremento de temperatura.

Abstract

This research calibrates and validates a model for monocrystalline photovoltaic systems in SAM (System Advisor Model) for power generation simulation, considering the meteorological characteristics of Cuenca, Ecuador, close to the equatorial line. The electrical performance is calculated by arranging photovoltaic systems with specific characteristics, with inclinations that respond to conventional local roofing and different orientations. Efficiency is calculated with in-situ measurements over a period of 18 days. Meteorological data were used to calibrate a weather file for the year 2016. Annual yields are estimated according to inclination and orientation, and technical characteristics of the photovoltaic system. Losses are detected due to dirt accumulation and increase in temperature of the panels. The model is validated by linear regression, by comparing the simulated values with the data obtained from in-situ measurements of a reference panel deployed horizontally. The results show an average efficiency loss of 2,77% for dirt conditions and up to 30% for temperature increases.

^{1,*}Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉:

ismael.izquierdo.torres@ucuenca.edu.ec, <http://orcid.org/0000-0003-0728-8978>,

<http://orcid.org/0000-0003-4107-4594>

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Ecuador.

<http://orcid.org/0000-0001-9992-3494>

³Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca, Ecuador. <http://orcid.org/0000-0001-5551-5026>

Recibido: 06-07-2018, aprobado tras revisión: 05-11-2018

Forma sugerida de citación: Izquierdo-Torres, I. F.; Pacheco-Portilla, M. G.; González-Morales, L. G. y Zalamea-León, E. F. (2019). «Simulación fotovoltaica considerando parámetros de integración en edificaciones». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 21-31. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.02>.

La validación del modelo mostró un coeficiente de determinación $R^2 = 0,996$ y un RMSE normalizado de 8,16 %. Se concluye además que, por la latitud particular del sitio en estudio, a diferencia de la mayor parte del planeta, la disposición de paneles fotovoltaicos en cualquier orientación considerando pendientes bajas, no reduce significativamente el rendimiento en la generación de energía eléctrica anual.

Palabras clave: energías renovables, monocristalino, SAM, simulación fotovoltaica.

The validation of the model showed a determination coefficient $R^2=0,996$ and a normalized Root Mean Square Error (RMSE) of 8,16%. It is concluded that, because of the particular latitude of the study site, unlike most of the planet, the provision of photovoltaic panels in any orientation considering low slopes, does not significantly reduce the annual power generation performance.

Keywords: Monocrystalline, Photovoltaic Simulation, SAM, Renewable Energies.

1. Introducción

Las crecientes demandas energéticas y procesos antropogénicos causantes del cambio climático hacen necesario el recurrir a fuentes alternativas de energía limpia, renovable y con potencial de expansión con menor impacto [1]. Una condición ideal es que puedan, además, desplegarse en edificaciones y contextos urbanos [2,3]. La tecnología solar fotovoltaica es una de las principales alternativas para afrontar decididamente la problemática energética global, tanto por el potencial existente para su expansión, sumado a costos cada vez más convenientes [4,5].

Por condiciones de localización, Ecuador está en una latitud en la que el potencial solar es particular e importante acorde a estudios en estas locaciones [6,7]. Ecuador es un país en desarrollo con creciente consumo energético y estacionalidad poco variable a lo largo del año [8,9], en consecuencia, existen niveles altos de irradiación relativamente constantes [10]; además, posee un gran potencial de aprovechamiento de energía solar como alternativa para la efectiva disminución de contaminantes atmosféricos y los efectos globales del cambio climático [11–13].

Sin embargo, es necesario el determinar el potencial de generación energética variable en cada entorno urbano, pues cada ciudad posee características propias en recursos y demandas energéticas particulares [11], [14], como antesala para establecer normativas y regulaciones urbanísticas [15] y de infraestructura energética [16]. La agencia internacional IRENA (*International Renewable Energy Agency*), recomienda el aprovechamiento de las grandes áreas de envolventes y techumbres para el emplazamiento de sistemas de captación de energía como complemento a medidas de eficiencia energética en edificaciones, implicando la producción de energía de forma distribuida [12].

En el caso de tecnologías solares fotovoltaicas o solar térmica deben considerarse aspectos de impacto urbanístico, por ello la opción es que las superficies de captación estén coplanares en la edificación; formando parte de la envolvente [17]. Además, deben desplegarse en coherencia con los consumos, en función de cada edificación [18].

Actualmente están en desarrollo paneles fotovoltaicos (desde ahora PV) que son elementos constructivos arquitectónicos con capacidad de generación energética, como placas de revestimiento, vidrios, filtros solares e incluso tejas que, respetando la geometría y siendo parte de la envolvente, cumplen el concepto de integración arquitectónica [*PV Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*] [19–21]. Este trabajo pretende determinar la eficiencia eléctrica PV de placas monocristalinas acorde a inclinación y orientación, para así prever una base metodológica para desarrollar un modelo de predicción del desempeño y rendimiento de otras tecnologías PV, adaptables o integrables en

envolventes, lo cual implica medir rendimientos en distintas orientaciones e inclinaciones.

Para ciudades como Cuenca, no existen criterios claros respecto a parámetros de inclinación y orientación óptimas PV, asumiéndose como adecuada cualquier inclinación cercana a la horizontal y orientada contraria a su latitud [22]. Sin embargo, en dicha configuración no se contemplan criterios de adaptación coplanar a edificaciones, así como el efecto de la acumulación de suciedad en el rendimiento del sistema, cuyas pérdidas documentadas varían entre el 5 % [23] y 35 % [24].

En instalaciones PV, a más de estos factores, la temperatura superficial de los módulos fotovoltaicos también afecta a la eficiencia del sistema [25–28]. Adicionalmente, es necesario considerar los aspectos económicos y las demandas energéticas, para así maximizar la producción en los momentos de mayor demanda o de mayor costo energético [29].

El presente estudio plantea una metodología para obtener un modelo de simulación en el programa SAM (*System Advisor Model*) [30] para estimar la producción eléctrica de paneles PV. Se aplica para ello una validación en placas PV de tipo monocristalino; en este modelo se estudian condiciones y consecuencias de orientación, inclinación y pérdidas de eficiencia por acumulación de suciedad y por incrementos de temperatura, en el contexto particular planteado, calibrándose el modelo acorde a estos parámetros. Para ello es necesario el ajuste del modelo en SAM, y del archivo climático correspondiente. Se obtiene un modelo válido para simulaciones con respecto a valores reales de producción [31], evitando recurrir a mediciones *in situ* por períodos de un año o más para determinar el rendimiento PV, o usar otros modelos con mayor incertidumbre y que no sean de acceso libre para el usuario. De esta manera, la metodología de calibrado podría ser replicada en otras locaciones.

2. Materiales y métodos

El presente estudio se enfoca en la calibración y validación de un modelo de simulación de un sistema fotovoltaico monocristalino a partir de cortos períodos de medición *in situ* y, además, un archivo climático de la localidad, generado en formato legible por el *software* (SAM CSV). Se consideran también parámetros de pérdidas de desempeño debido a la acumulación de suciedad y por incremento de temperatura en función del clima e irradiancia global.

Las mediciones *in situ* se llevaron a cabo durante los meses de diciembre de 2016 y enero de 2017. Para ello se instalaron tres paneles PV monocristalinos junto a una estación meteorológica en la ubicación ($-2,901691^{\circ}\text{S}$, $-79,010151^{\circ}\text{E}$). Cada panel tiene una potencia nominal de 100 W, cuyas dimensiones son 0,54 m de ancho y

1,2 m de largo, de 36 celdas (Figura 1), conectados eléctricamente a un conjunto de resistencias empleadas como cargas que variaban entre 1 y 100 Ω en función de la irradiancia recibida en los paneles para obtener su máxima potencia, y al equipo de medición HIOKI PW 3337-03 (Figura 2). Se procede a la toma de datos en corriente continua de voltaje, corriente y potencia en intervalos de cinco minutos, que posteriormente fueron transformados a intervalos horarios.



Figura 1. Paneles solares monocristalinos a distintas inclinaciones



Figura 2. Equipo HIOKI PW 3337-03 y resistencias de carga

Las mediciones *in situ* se realizaron basándose en la inclinación y orientación de los paneles, durante 12 días del mes de diciembre de 2016 entre las 07:30 y las 17:00. Se obtuvieron datos del panel horizontal y datos de paneles ubicados a 14,00°, 18,26° y 26,56° de inclinación (en todas las orientaciones: N, S, E, O) con lo que se valida el modelo en SAM. Las inclinaciones consideradas responden a pendientes características de techumbres en edificaciones de baja altura y vivienda en la ciudad de Cuenca [32]. Para la medición de rendimiento según inclinación y orientación, se utilizó la metodología mostrada en la Tabla 1.

Posteriormente se calculó la eficiencia en función de la Ecuación (1):

$$\eta = \frac{P}{E \times A_c} \times 100 \quad (1)$$

Tabla 1. Variación paramétrica para medir el desempeño de paneles monocristalinos en base a su inclinación y orientación

Este			
Día	Panel 1	Panel 2	Panel 3
1	0°	14,00°	18,26°
2	0°	18,26°	26,56°
3	0°	26,56°	14,00°
Sur			
Día	Panel 1	Panel 2	Panel 3
4	0°	14,00°	18,26°
5	0°	18,26°	26,56°
6	0°	26,56°	14,00°
Oeste			
Día	Panel 1	Panel 2	Panel 3
7	0°	14,00°	18,26°
8	0°	18,26°	26,56°
9	0°	26,56°	14,00°
Norte			
Día	Panel 1	Panel 2	Panel 3
10	0°	14,00°	18,26°
11	0°	18,26°	26,56°
12	0°	26,56°	14,00°

Donde η es la eficiencia de los paneles, P es la potencia de salida, E es la irradiancia del sol, y A_c es el área de captación o área del panel. De las tres inclinaciones propuestas se seleccionó la mejor de cada orientación y se realizó una medición adicional durante tres días en el mes de enero de 2017 para determinar la configuración óptima para esta época del año (tanto en inclinación y orientación), siguiendo la metodología indicada en la Tabla 2.

Tabla 2. Configuración óptima de paneles monocristalinos para el mes de enero 2017

Día	Panel 1	Panel 2	Panel 3
1	S 26,56°	E 14,00°	N 18,26°
2	S 26,56°	N 18,26°	O 18,26°
3	S 26,56°	O 18,26°	E 14,00°

De las cuatro configuraciones analizadas, se seleccionó la óptima según los valores de producción energética promedio durante los días de medición.

Por otra parte, para estimar las pérdidas energéticas por la acumulación de suciedad, se realizaron mediciones semanales del desempeño PV, empezando el 11 de enero y culminando el 1 de febrero de 2017, ubicando la orientación e inclinación determinadas como óptimas. Para este caso uno de los paneles cumplió la función de control y recibió limpieza durante los días de medición, mientras que los dos restantes no

tuvieron ninguna intervención; sin embargo, debido a que los eventos de precipitación en Cuenca son frecuentes, los paneles que no recibieron mantenimiento de forma manual, presentaron cambios en la superficie por efecto de la precipitación, que limpiaba los paneles durante los días de estudio. Es necesario considerar que el clima local muestra alta pluviosidad, existiendo precipitaciones durante todo el año en mayor o menor medida; siendo extraños los periodos sin lluvias por más de un mes [33].

Para la estimación de pérdidas por incremento de temperatura, se midió la salida de potencia de los paneles monocristalinos y la temperatura superficial de los mismos; posteriormente se calculó la eficiencia mediante la Ecuación 1 con los datos de irradiancia obtenidos de la estación meteorológica, y se establecieron valores promedio de pérdida de eficiencia por rangos de irradiancia. Entonces, con los datos obtenidos de pérdidas promedio de desempeño por acumulación de suciedad y por rangos de irradiancia se procedió a calibrar el modelo en SAM. La información incorporada y tomada de lecturas en sitio, fue un archivo climático con información horaria de la localidad, durante el año 2016 generado de acuerdo con valores horarios de radiación directa (W/m^2), radiación difusa (W/m^2), radiación global (W/m^2), humedad relativa (%), ángulo cenital ($^\circ$), presión atmosférica (mbar), temperatura ambiente ($^\circ C$), precipitación (mm), dirección y velocidad del viento ($^\circ$ y m/s). Así, el archivo climático del sitio de estudio, no es el resultado de la interpolación de valores de variables climáticas entre dos localidades, que ocasiona un mayor grado de incertidumbre en las predicciones de los modelos, sino que la validación de resultados se realiza con una comparación real suscitada entre lecturas de producción PV y condiciones climáticas detectadas al instante.

Adicionalmente, se incorporó a las especificaciones del *software*, datos técnicos de los paneles PV utilizados, los cuales son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de panel fotovoltaico simulado

Especificaciones			
Tipo de celda	Silicio monocristalino	Voc	21,6 V
Área del módulo	0,645 m ²	Coefficiente de Temperatura Voc	-0,38 %/ $^\circ C$
NOCT	46 $^\circ C$	Coefficiente de Temperatura Isc	0,1%/ $^\circ C$
Vmp	17,3 V	Coefficiente de Temperatura MPP	-0,41 %/ $^\circ C$
Imp	5,78 A	Número de celdas en serie	36

En este estudio se definen aspectos relacionados con el procesamiento de energía, por lo que, para el modelo se consideró el punto de máxima potencia del panel para cada estimación. Las pérdidas en el sistema fueron establecidas sobre la base de lecturas de

eficiencia obtenidas *in situ* por rangos de irradiancia en intervalos de 200 W/m^2 y por pérdidas debido a la acumulación de suciedad, que para efectos de cálculo se utiliza como base una pérdida de 5 % establecida por defecto dentro del programa. Con los datos de rendimientos simulados, se generó una base de datos comparable con los valores medidos *in situ* del panel horizontal y se calcularon las métricas: Coeficiente de determinación R^2 (Ecuación 2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 3) y su valor normalizado, error de sesgo medio (MBE) (Ecuación 4) así como su valor normalizado; finalmente, se establece el intervalo de confianza de 90 % (IC 90 %) (Ecuación 5), para intervalos horarios, recomendados por algunos estudios de validación de SAM [34,35], para esta época del año. Los valores del RMSE y MBE fueron normalizados con respecto al valor máximo reportado en las mediciones *in situ*.

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (SAM_i - Medido_{avg})^2}{\sum_i^N (SAM_i - SAM_{avg})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (SAM_i - Medido_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_i^N (SAM_i - Medido_i)}{N} \quad (4)$$

$$IC_{90\%} = 1.645 \times [Std(SAM_i - Medido_i)] \quad (5)$$

3. Resultados y discusión

De acuerdo con la variación paramétrica para medir el desempeño y cálculos de eficiencia en el mes de diciembre, se obtuvieron los resultados mostrados de mayor a menor en la Tabla 4.

Tabla 4. Mejores inclinaciones por orientación

Orientación	Mejor inclinación
Este	14,00 $^\circ$
Sur	26,56 $^\circ$
Oeste	18,26 $^\circ$
Norte	18,26 $^\circ$

Los resultados de la Tabla 4 se deben a la posición que tiene el Sol en esta época del año (cercana al solsticio), por lo que la orientación sur supera a la orientación norte en cualquier inclinación; sin embargo, la orientación este a 14 $^\circ$ otorgó una mayor eficiencia debido a las mañanas con alta irradiancia y tardes de alta nubosidad, por lo que fue seleccionada para el posterior análisis de influencia de suciedad.

En el análisis de influencia de suciedad, durante la primera semana de mediciones, no se presentaron

pérdidas en el desempeño debido a la cantidad de precipitación acumulada semanal (41,8 mm); a la segunda semana de monitoreo se registró un total de precipitación de 6 mm, que como consecuencia resulta en manchas de suciedad en la superficie y a una disminución poco significativa en la eficiencia de los paneles (0,7 %).

En la tercera semana no existieron eventos de lluvia, siendo evidente la presencia de material depositado en la superficie de los paneles; las mediciones correspondientes mostraron una reducción promedio de eficiencia de 2,77 %, un máximo de 3,68 % y un mínimo de 1,87 %. Una semana después de esta medición, la precipitación acumulada (13,4 mm) evidencia la remoción de una cantidad significativa de partículas en su superficie, haciendo que las pérdidas por esta sean despreciables. Al ser muy bajo el valor promedio de pérdida de eficiencia, para la simulación en SAM, se optó por el valor predefinido de 5 %. Como se mencionó, en la localidad no existen períodos largos sin lluvia, característica de las ciudades andinas en altura.

A partir de los datos generados se pudo establecer una base comparativa para calibrar y validar el modelo en SAM, el cual se generó a partir de los parámetros especificados en la metodología. Se compararon los resultados del modelo con los obtenidos con mediciones *in situ* del panel horizontal, de esta comparación se calcularon datos estadísticos de interés en la Tabla 5.

Tabla 5. Métricas calculadas

Métrica	Valor	Unidad
R^2	0,996	-
RMSE	5,263	W
NRMSE	8,156	%
MBE	-1,04	W
NMBE	-1,616	%
IC 90 %	8,522	%

De forma gráfica, los datos *in situ* y los obtenidos por el modelo se muestran en la Figura 3. Se evidencia una fuerte correlación lineal respaldada en el valor del coeficiente de determinación R^2 encontrado. Los valores de RMSE y NRMSE indican el grado de error que posee la estimación frente a lecturas reales, y en este caso particular son bastante aceptables [36].

Para determinar la subestimación o sobrestimación del modelo, es empleado el error de sesgo medio o MBE (*Mean Bias Error*) y su valor normalizado denotando que el modelo subestima el desempeño del sistema en un 1,61 %. La Figura 4 muestra el comportamiento real del sistema y el estimado por el modelo en SAM para 12 días de medición, tomando como referencia validaciones en cortos períodos efectuadas en TRNSYS por [36,37], donde sus valores máximos de generación son tendenciales, observándose en general una ligera subestimación del modelo. Adicionalmente, existen

estudios donde se analiza la resolución temporal en intervalos menores a una hora [38] y otro donde se comparan valores simulados e *in situ* en un período de dos días [39].

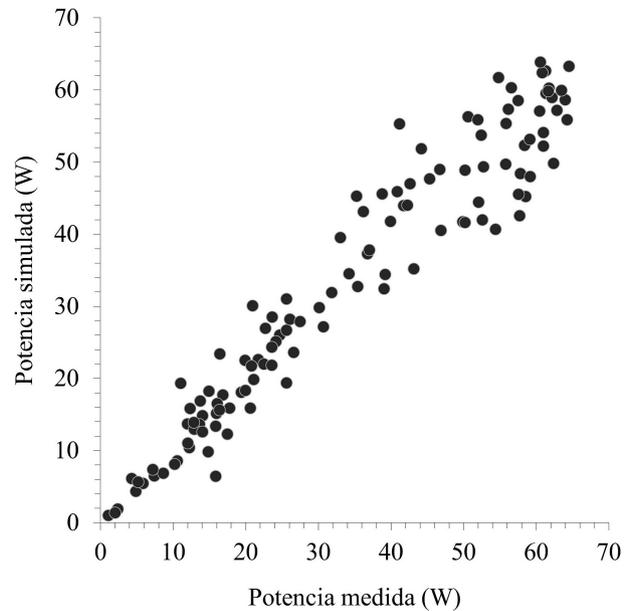


Figura 3. Gráfica de dispersión de potencia medida y simulada

El valor del IC 90 % (intervalo de confianza de 90 %) de la Tabla 5, indica que el 90 % de los valores simulados se encuentran entre un $\pm 8,522$ % de los valores medidos *in situ*, valor muy próximo al ± 8 %, con el que se han validado siete casos en estudios referenciales con SAM [34]. Cabe recalcar que en una simulación anual este valor se reduce, ajustándose mejor al modelo lineal y presentando mayor validez.

Adicionalmente, la estimación de temperatura de las celdas PV por parte del modelo difiere de las mediciones realizadas *in situ*. Para compararlas se empleó la temperatura promedio anual de la base de datos del modelo ya que para los mismos niveles de radiación la temperatura parece comportarse de manera similar a lo largo del año; mientras que para los datos *in situ* se ocuparon valores puntuales de un día de medición. Se observa una diferencia promedio importante de $13,33$ °C de los datos mostrados en la Tabla 6, y las celdas sin valores denotan que, durante el día, los valores de radiación no estuvieron dentro de estos intervalos. Se asume, además, que la diferencia puede ser mayor ya que el modelo estima la temperatura de las celdas, mientras que las mediciones se las realizaron sobre el vidrio del panel que es inferior a la temperatura superficial de las celdas [40], esta variación de temperatura también puede atribuirse a la intensidad de rayos UV, por tratarse de una locación en altura [41]. Por ello, se recomendaría realizar lecturas en laboratorio para corroborar este incremento de temperatura en la superficie de las celdas.

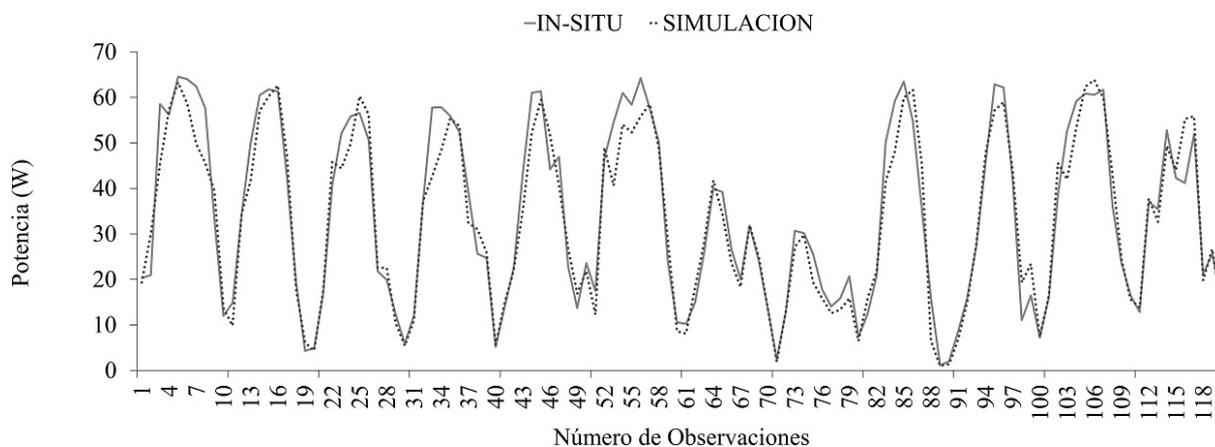


Figura 4. Comparación de desempeño

Tabla 6. Comparación de la temperatura simulada y la temperatura medida

Irradiancia (W/m ²)	Temperatura promedio anual (°C)	Temperatura Medida (°C)
0-200	15,81	-
200-400	21,05	33,5
400-600	24,56	-
600-800	27,02	40
800-1000	30,33	43
1000-1200	34,08	49,33

Con los valores de estas métricas se determinó que el modelo es válido. Por ello es factible estimar la producción energética en períodos más prolongados, con la disponibilidad del archivo climático. Al realizar una simulación anual expresada en kWh/año para un módulo de 100 W, considerando los parámetros de orientación e inclinación, se obtienen los rendimientos señalados en la Tabla 7.

Así la situación que presenta mayor generación es la disposición horizontal; sin embargo, no se ajusta a un posible despliegue en techumbres inclinadas locales, además, no es una alternativa recomendable para aprovechamiento de limpieza pluvial.

Tabla 7. Producción energética anual (kWh/año)

Ángulo	Norte	Sur	Este	Oeste
0°	119,16			
14°	116,5	116,94	117,21	116,24
18,26°	114,66	115,24	115,63	114,35
26,6°	109,76	110,64	111,35	109,5

En la Tabla 7 se establece una particularidad interesante respecto a la orientación y pendiente de PV en el contexto de estudio. La máxima producción efectivamente se alcanza con la disposición horizontal,

pero supera en apenas un 8,8 % en generación anual respecto a la mínima producción establecida en este estudio (orientación oeste con 26,56° de inclinación), pero, por las limitaciones mencionadas ello implica “no recomendable” el despliegue horizontal. En la comparación de rendimiento de los casos inclinados y orientados, se observa que a menor pendiente efectivamente se logra una mejor producción promedio, teniendo 5,8 % más de energía en el despliegue inclinado a 14° respecto al inclinado 26,56°; y 4,2 % con inclinación de 18° respecto a inclinado en 26,56°. En análisis de rendimientos puntuales, la máxima producción se observa en orientación este con 14° de inclinación y la mínima con orientación oeste y 26,56° de inclinación, siendo más eficiente la primera disposición en un 7,0 % y los demás rendimientos son condiciones intermedias. Las pérdidas medidas en este estudio son menores, considerando por ejemplo estimaciones de rendimiento PV efectuado en condición de clima estacional moderado (36° de latitud) en donde un desvío de 90° respecto la orientación óptima significa una reducción de rendimiento PV de 17 % [42]; lógicamente una orientación con mayor desviación contraria al recorrido solar y en latitudes más alejadas al ecuador supondrían una reducción de rendimiento PV muy superiores. La explicación para el rendimiento superior con orientación este es por tendencia a mañanas con menor nubosidad.

Para el caso de valores mensuales es observable una diferencia más marcada, entre 7,33 kWh/mes en el mes de julio (mes con mínima irradiación) y 12,19 kWh/mes en noviembre (máxima irradiación) respectivamente (Figura 5).

Esto refleja la estabilidad de producción existente en el contexto, frente a estudios de abastecimiento PV desarrollados en clima estacional moderado (38° latitud sur), en donde se observa que la generación se puede triplicar en meses de verano respecto a los invernales [43]; y en climas con estacionalidad marcada, como Helsinki (Finlandia), en latitud extrema (60° latitud norte) en donde se observa que la producción en

verano excede en más de diez veces respecto a la esperada en invierno. Esto se traduce en una ventaja obvia de las zonas ecuatoriales ya que sería más adaptable frente a demandas de edificaciones y urbanas.

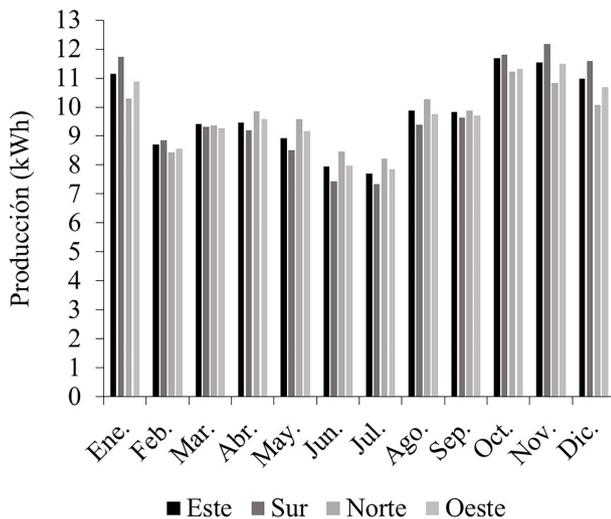


Figura 5. Producción mensual estimada mediante simulación en SAM

4. Conclusiones

Un paso importante para poder desarrollar el potencial de generación de energía renovable de una ciudad, es validar las herramientas que permitan reducir incertidumbres de estimaciones y simulaciones, en este caso de producción PV. Este estudio muestra que, mediante ajustes puntuales en una serie de parámetros, el modelo SAM puede emplearse con baja incertidumbre en la ciudad de Cuenca (Ecuador), entregando un modelo fiable para proyectar una posible generación eléctrica PV. Para otras localidades, se puede optar por una calibración similar a la empleada en este estudio, y con validación de lecturas de rendimiento *in situ* se puede asegurar que el modelo sea válido.

Entre otros resultados obtenidos, se ha medido la pérdida de eficiencia por acumulación de suciedad, que en promedio es de 2,77 %, siendo no significativo y que permitiría prescindir de una limpieza recurrente de los paneles PV, pues la continuidad de precipitaciones locales es suficiente para recuperar la eficiencia. Por otra parte, en el caso de las pérdidas por efecto de la temperatura se miden como valores elevados bajo presencia de alta irradiación, explicable por condiciones constructivas de las celdas o por la cantidad de irradiación con elevados índices de rayos UV, por lo que este fue un parámetro relevante durante la calibración del modelo.

El valor de las métricas estadísticas del modelo frente a lecturas en sitio fue de $R^2 = 0,996$, $NRMSE = 8,156$ y $NMBE = -1,616$ % demostrando

que, a pesar de preverse una subestimación, es adecuado para emplearlo en predicciones de escenarios futuros en simulaciones anuales, pues guarda una tendencia lineal marcada con respecto a los valores *in situ*. Se desarrolla una metodología y se obtiene una herramienta validada, útil para la estimación de generación eléctrica mediante paneles solares monocristalinos.

En cuanto a rendimientos detectados en el contexto específico, el emplazamiento de sistemas PV tiene una generación anual mayor al disponerse de cara al este con pendiente cercana a la horizontal, pero sin diferencias significativas respecto al resto de orientaciones con pendientes similares; esto es atribuible a la ubicación geográfica del área de estudio que presenta los niveles estables de irradiancia a lo largo del año. También, a pesar de observarse que, dependiendo de la inclinación y orientación, es esperable que cerca de los meses de junio-julio se produzca aproximadamente un 40 % menos de electricidad (mes de mínima irradiación) frente a noviembre (mes de máxima irradiación), la producción sería mucho más estable respecto a otras latitudes en balance anual, y con ello adaptable a una potencial conexión a red inteligente o *Smart Grid* en generación distribuida o a almacenamiento para autoconsumo.

Referencias

- [1] Z. A. Elum and A. S. Momodu, "Climate change mitigation and renewable energy for sustainable development in Nigeria: A discourse approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 72–80, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.040>
- [2] A. Grubler, X. Bai, T. Buettner, S. Dhakal, D. J. Fisk, T. Ichinose, J. E. Keirstead, G. Sammer, D. Satterthwaite, N. B. Schulz *et al.*, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. International Institute for Applied Systems Analysis and Cambridge University., 2012, ch. Urban energy systems, pp. 1307–1400. [Online]. Available: <https://goo.gl/rVdsU6>
- [3] A. Barragán-Escandón, J. Terrados-Cepeda, and E. Zalamea-León, "The role of renewable energy in the promotion of circular urban metabolism," *Sustainability*, vol. 9, no. 12, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su9122341>
- [4] A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, and R. Mamat, "Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3314–3322, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.013>

- [5] J. Byrne, J. Taminiau, J. Seo, J. Lee, and S. Shin, "Are solar cities feasible? a review of current research," *International Journal of Urban Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 239–256, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1331750>
- [6] M. Nadim, M. R. H. Rashed, A. Muhury, and S. M. Mominuzzaman, "Estimation of optimum tilt angle for PV cell: A study in perspective of bangladesh," in *2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dec 2016, pp. 271–274. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICECE.2016.7853908>
- [7] P. Fitriaty and Z. Shen, "Predicting energy generation from residential building attached Photovoltaic Cells in a tropical area using 3D modeling analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pp. 1422–1436, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.133>
- [8] B. Trewin, *State of the tropics*. James Cook University, 2014, ch. The climates of the Tropics, and how they are changing, pp. 39–51. [Online]. Available: <https://goo.gl/hH8pv1>
- [9] A. Bykerk-Kauffman. (2018) Seasons and why the equator is warmer than the poles. Pedagogy in Action the SERC portal for Educators. Science Education Resource Center. [Online]. Available: <https://goo.gl/vsDCFB>
- [10] IRENA, *Global Atlas for Renewable Energy: A World of Renewables*. International Renewable Energy Agency, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/adpQop>
- [11] M. M. Riyahi Alam, A. Behfar, and R. Shahmoradi, "Potential application of solar power systems for residential buildings in high-density urban pattern: The case of the Eixample district, city of the Barcelona, in Spain," *Recent Researches in Environmental and Geological Sciences*, pp. 342–347, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/t6dSQZ>
- [12] IRENA, *Renewable Energy in Cities*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/EN2Ufq>
- [13] T. Razykov, C. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. Ullal, and H. Upadhyaya, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Solar Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1580–1608, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- [14] A. Barragán-Escandón, J. Terrados-Cepeda, E. Zalamea-León, and P. Arias-Reyes, "Electricity production using renewable resources in urban centres," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, vol. 171, no. 1, pp. 12–25, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/jener.17.00003>
- [15] A. Curreli, G. Serra-Coch, A. Isalgue, I. Crespo, and H. Coch, "Solar energy as a form giver for future cities," *Energies*, vol. 9, no. 7, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en9070544>
- [16] P. Chen, R. Salcedo, Q. Zhu, F. de Leon, D. Czarkowski, Z. Jiang, V. Spitsa, Z. Zabar, and R. E. Usef, "Analysis of voltage profile problems due to the penetration of distributed generation in low-voltage secondary distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2020–2028, Oct 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2209684>
- [17] M. Wall, M. C. M. Probst, C. Roecker, M.-C. Dubois, M. Horvat, O. B. Jørgensen, and K. Kappel, "Achieving solar energy in architecture-IEA SHC Task 41," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 1250–1260, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.138>
- [18] K. Farkas, F. Frontini, L. Maturi, A. Scognamiglio, M. C. Munari Probst, and C. Roecker, *Designing photovoltaic systems for architectural integration. Criteria and guidelines for product and system developers*, Solar Heating & Cooling Programme- International Energy Agency, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/fj36VW>
- [19] B. P. Jelle, "Building integrated photovoltaics: A concise description of the current state of the art and possible research pathways," *Energies*, vol. 9, no. 1, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en9010021>
- [20] M. C. Munari Probst, C. Roecker, F. Frontini, A. Scognamiglio, K. Farkas, L. Maturi, and I. Zanetti, "Solar energy systems in architecture - integration criteria and guidelines," *Infoscience EPFL scientific publications*, p. 214, 2013, report of International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme Task 41 Solar Energy & Architecture. [Online]. Available: <https://goo.gl/4Rx7e5>
- [21] Eletrek. (2018) Tesla solar roof. [Online]. Available: <https://goo.gl/Bnydud>
- [22] A. Gharakhani Siraki and P. Pillay, "Comparison of PV system design software packages for urban applications," in *World Energy Congress Montreal*, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/Vhuhyg>

- [23] G. Cáceres, S. Nasirov, H. Zhang, and G. Araya-Letelier, “Residential solar PV planning in Santiago, Chile: Incorporating the PM10 parameter,” *Sustainability*, vol. 7, no. 1, pp. 722–440, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su7010422>
- [24] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz, and L. L. Kazmerski, “Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63, pp. 33–61, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.059>
- [25] B. V. Chikate and Y. Sadawarte, “The factors affecting the performance of solar cell,” *International Journal of Computer Applications (0975-8887)*, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/d7txov>
- [26] M. E. Meral and F. Dinçer, “A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2176–2184, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.010>
- [27] Y. Jia-Ying, D. Kun, T. Reindl, and A. G. Aberle, “Outdoor PV module performance under fluctuating irradiance conditions in tropical climates,” *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 238–247, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.064>
- [28] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/7D9UYk>
- [29] C. Hachem, A. Athienitis, and P. Fazio, “Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1864–1877, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.027>
- [30] NREL. (2017) System Advisor Model (SAM). National Renewable Energy Laboratory. [Online]. Available: <https://goo.gl/WTKtPn>
- [31] J. Freeman, J. Whitmore, N. Blair, and A. P. Dobos, “Validation of multiple tools for flat plate photovoltaic modeling against measured data,” in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, June 2014, pp. 1932–1937. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925304>
- [32] I. F. Izquierdo Torres and M. G. Pacheco Portilla, *Evaluación de la eficiencia de paneles solares como sistema de captación de energía para edificaciones del área urbana de Cuenca*. E. Universidad de Cuenca, Ed. Tesis de grado, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/wSEZ1X>
- [33] CLIMATE-DATA. (2017) Clima Cuenca. climate-data.org. [Online]. Available: <https://goo.gl/SBnaa2>
- [34] J. Freeman, J. Whitmore, L. Kaffine, and A. P. Blair, Nate Dobos, “System Advisor Model: Flat plate photovoltaic performance modeling validation report,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/47cQ1r>
- [35] E. Rudié, A. Thornton, N. Rajendra, and S. Kerrigan, “System Advisor Model performance modeling validation report: Analysis of 100 sites,” Locus Energy, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/zpfUZA>
- [36] D. F. Al Riza, S. Gilani, and M. Aris, “Measurement and simulation of standalone solar PV system for residential lighting in Malaysia,” *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, vol. 2, no. 1, pp. 6–12, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/G8shmj>
- [37] K. Kanyarusoke, J. Gryzagoridis, and G. Oliver, “Validation of TRNSYS modelling for a fixed slope photovoltaic panel,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, no. 6, pp. 4763–4772, 2016. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.3906/elk-1502-38>
- [38] M. A. Meybodi, L. R. Santigosa, and A. C. Beath, “A study on the impact of time resolution in solar data on the performance modelling of CSP plants,” *Renewable Energy*, vol. 109, pp. 551–563, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.024>
- [39] V. Håvard Breisnes, “Modelling of photovoltaic modules with battery energy storage in Simulink/MATLAB: With in-situ measurement comparisons,” Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/13bxEy>
- [40] F. Chenlo Romero, “Cálculo de la temperatura de operación de células solares en un panel fotovoltaico plano,” Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Madrid - España, Tech. Rep., 2002. [Online]. Available: <https://goo.gl/SFrX4r>
- [41] M. Blumthaler, W. Ambach, and R. Ellinger, “Increase in solar UV radiation with altitude,” *Journal of Photochemistry and*

- Photobiology B: Biology*, vol. 39, no. 2, pp. 130–134, 1997. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(96\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)00018-8)
- [42] E. F. Zalamea-León and R. H. García-Alvarado, “Integración de captación activa y pasiva en viviendas unifamiliares de emprendimientos inmobiliarios,” *Ambiente Construído*, vol. 18, no. 1, pp. 445–461, 2018. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100231>
- [43] E. Zalamea and R. García Alvarado, “Roof characteristics for integrated solar collection in dwellings of Real-Estate developments in Concepcion, Chile,” *Revista de la construcción*, vol. 13, no. 3, pp. 36–44, 12 2014. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2014000300005>



APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL FEED-FORWARD BACKPROPAGATION PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS MECÁNICAS EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO

APPLICATION OF FEED-FORWARD BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK FOR THE DIAGNOSIS OF MECHANICAL FAILURES IN ENGINES PROVOKED IGNITION

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

Resumen

En la presente investigación se explica la metodología para la creación de un sistema de diagnóstico aplicado a la detección de fallas mecánicas en vehículos con motores a gasolina mediante redes neuronales artificiales, el sistema se basa en el estudio de la fase de admisión del ciclo Otto, el cual es registrado a través de la implementación física de un sensor MAP (*Manifold Absolute Pressure*). Se emplea un estricto protocolo de muestreo y su correspondiente análisis estadístico. Los valores estadísticos de la señal del sensor MAP: área, energía, entropía, máximo, media, mínimo, potencia y RMS se seleccionaron en función al mayor aporte de información y diferencia significativa. Los datos se obtuvieron con la aplicación de 3 métodos estadísticos (ANOVA, matriz de correlación y Random Forest) para tener una base de datos que permita el entrenamiento de una red neuronal *feed-forward backpropagation*, con la cual se obtiene un error de clasificación de $1.89e^{-11}$. La validación del sistema de diagnóstico se llevó a cabo mediante la provocación de fallas supervisadas en diferentes motores de encendido provocado.

Palabras clave: diagnóstico, fallos mecánicos, red feed-forward backpropagation, ANOVA, matriz de correlación, Random Forest.

Abstract

This research explains the methodology for the creation of a diagnostic system applied to the detection of mechanical failures in vehicles with gasoline engines through artificial neural networks, the system is based on the study of the phase of Admission of the Otto cycle, which is recorded through the physical implementation of a MAP sensor (*Manifold Absolute Pressure*). A strict sampling protocol and its corresponding statistical analysis are applied. The statistical values of the MAP sensor signal as: area, energy, entropy, maximum, mean, minimum, power and RMS, were selected according to the greater input of information and significant difference. The data were obtained with the application of 3 statistical methods (ANOVA, correlation matrix and Random Forest) to obtain a database that allows the training of a neural network feed-forward backpropagation, with which you get an error of Classification of $1.89e^{-11}$. The validation of the diagnostic system was carried out by the generating supervised failures in different engines with provoked ignition.

Keywords: diagnosis, mechanical failures, network feed-forward backpropagation, ANOVA, correlation matrix, Random Forest.

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

<http://orcid.org/0000-0003-2300-9457>, <http://orcid.org/0000-0002-3846-2599>,

<http://orcid.org/0000-0003-2142-3769>

Recibido: 21-08-2018, aprobado tras revisión: 09-11-2018

Forma sugerida de citación: Contreras Urgilés, W.; Maldonado Ortega, J. y León Japa, R. (2019). «Aplicación de una red neuronal feed-forward backpropagation para el diagnóstico de fallas mecánicas en motores de encendido provocado». *INGENIUS*. N.º 21, (enero-junio). pp. 32-40. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.03>.

1. Introducción

En la actualidad en el área del transporte automotor los operarios y técnicos utilizan diagramas rudimentarios para el diagnóstico y reparación de motores de encendido provocado (MEP), lo que implica, subjetividad en el diagnóstico, desventajas en el tiempo de detección de fallas, falta de asertividad, y como consecuencia, se tienen altos costos de mantenimiento.

Por todo lo antes expuesto, es necesario aplicar nuevas metodologías y técnicas especializadas para conseguir diagnósticos en tiempos cortos que optimicen recursos para la detección de fallos en motores de vehículos a gasolina [1].

La complejidad de análisis e interpretación de parámetros de operación que intervienen en el MEP hace necesario el uso de redes neuronales y matemática computacional para un eficiente diagnóstico de fallos mecánicos en motores de ciclo Otto. La investigación de Howlett [2] muestra que mediante el análisis de la señal de la bujía con redes neuronales artificiales se puede monitorear el MEP para un diagnóstico o control de fallas.

De igual forma Antory [3] indica que es posible determinar con precisión diferentes tipos de fallas comunes en un motor diésel para automóviles mediante un modelo de diagnóstico que utiliza una variante de redes neuronales auto asociativas (AANN).

Estrategias paralelas a las redes neuronales son aplicables para el diagnóstico de fallos en el campo automotor. Chen y Zhao [4] aplican una variante paralela de las RNA conocidas como redes de base radial RBF, esta técnica es utilizada para el diagnóstico de fallas del sistema de combustible en el motor.

Se pueden aplicar estrategias paralelas para entrenar una RNA, por ejemplo, el entrenamiento de la red Elman modificada aplicada para el diagnóstico de fallas del motor. Dicho método es muy efectivo y puede obtener un buen resultado de diagnóstico, debido a que es una red recurrente y tiene una relación dinámica de entrada y salida [5], asimismo Lian *et al.* [6] presentan un método de diagnóstico para detección de fallas en motores de encendido provocado basado en la aplicación de lógica difusa y redes neuronales. Shah *et al.* [7] proponen un sistema de reconocimiento de fallas para motores de combustión interna, con aplicación de la transformada de *wavelet* discreta (DWT) y la técnica de redes neuronales de base radial (RBFN).

Cay [8] desarrolló un modelo de RNA basado en el algoritmo de retro propagación para un MEP con el objetivo de predecir el consumo de combustible específico del freno, la potencia efectiva y la temperatura de escape del motor. Cay *et al.* [9] presentaron un modelo de RNA capaz de predecir el rendimiento del MEP y las emisiones de escape en un motor que funcionaba con metanol y gasolina.

Las redes neuronales tienen diversas aplicaciones en

la calibración de motores de encendido por chispa. R. F. Turkson *et al.* [10] han propuesto que aquellas permiten la identificación del sistema para el prototipado rápido, la detección virtual, estrategias de control emergentes y aplicaciones de diagnóstico a bordo (OBD).

Otra importante aplicación de las redes neuronales (ANN) con modelos cinéticos como funciones de activación para las neuronas en la capa oculta es aplicable para el estudio de degradación del poliuretano de un colector de admisión automotriz con tratamiento isotérmico [11].

El sistema de diagnóstico propuesto puede detectar fallos en motores de encendido provocado que no son detectadas por la ECU (Engine Control Unit). El sistema se sustenta en la utilización de las señales de los sensores MAP y CMP, ya que tienen la facultad de reducir al mínimo el tiempo de diagnóstico, esto último evita usar técnicas intrusivas en el MEP como por ejemplo el uso de manómetros para medición de compresión de cilindros y presión de combustible, vacuómetro, escáner automotor, entre otras. Las técnicas antes indicadas tienen la función de determinar el fallo mecánico.

2. Métodos y materiales

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

2.1. Selección de la unidad experimental e instrumentación mínimamente invasiva

Se toma en consideración como principal objetivo evitar el desarmado de elementos y piezas del motor para diagnosticar fallas mecánicas, por lo que se determina medir la depresión del motor mediante la instalación de un sensor tipo MAP en una toma de vacío del múltiple de admisión, ubicándolo después de la mariposa de aceleración, de tal manera que la conexión no afecta el funcionamiento del motor.

La identificación de cada uno de los cilindros se realiza mediante el registro de la señal del sensor CMP. En la Figura 1 se presentan la unidad experimental puesta a prueba Motor Hyundai Sonata 2.0 DOHC, una computadora personal (PC), tableta, Ni DAQ-6009 y la interfaz del escáner automotor. En la Figura 2 se muestra la conexión del sensor MAP, la toma de vacío en el múltiple de admisión y la herramienta de adquisición de datos Ni DAQ-6009.



Figura 1. Instrumentación en el motor.



Figura 2. Conexión del sensor MAP.

2.2. Condiciones de toma de muestras

Se utiliza el *software* Labview 2017 junto con una tarjeta Ni DAQ-6009, para la obtención de muestras. Las muestras se adquieren en ralentí aproximadamente a 850 rpm con un rango de temperatura del MEP de entre 92 °C y 97 °C, carga del motor de 40 % y se aplica el escáner automotor para corroborarlas. Según un estudio preexperimental se determina que la señal del sensor MAP posee picos de mayor frecuencia, de tal manera que se realiza la toma de muestras a una velocidad de 10 KHz en un tiempo de 5 segundos para cada una de las señales, dicha velocidad supera el criterio de Nyquist (1.416 KHz).

2.3. Metodología para la obtención de datos

En la Figura 3 se presentan los elementos físicos necesarios para el muestreo de señales.

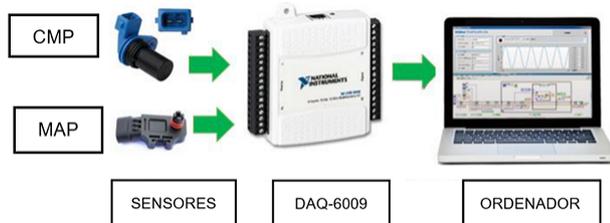


Figura 3. Elementos necesarios para la toma de muestras.

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

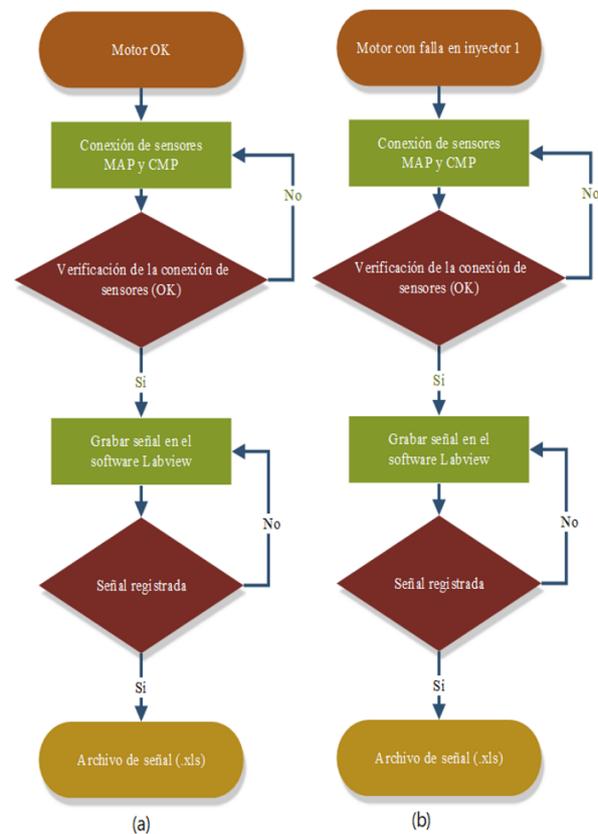


Figura 4. Flujograma de proceso para la adquisición de muestras (a) motor ok, (b) motor con falla.

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

En la Tabla 1 se indica el total de 18 fallas que se generan en la unidad experimental, cada una con su respectivo código de identificación; también se indica la condición del motor en óptimo funcionamiento.

2.4. Obtención de matriz de atributos

Una vez desarrollada la adquisición de señales temporales se procedió a elaborar un algoritmo en el *software* Matlab para lectura y obtención de matriz general de atributos. Dichos atributos son los siguientes: media geométrica, máximo, mínimo, mediana, covarianza, varianza, desviación estándar, moda, factor de curtosis, coeficiente de asimetría, energía, potencia, área bajo la curva, entropía, coeficiente de variación, rango, raíz media cuadrática y factor de cresta.

En la Figura 5 se ilustra el corte completo de un ciclo del motor ($720^\circ \pm 180^\circ$), con el reglaje de dis-

tribución de adelanto a la apertura de admisión (AAA) y retraso de cierre de admisión (RCA), correspondiente a cada uno de los cilindros, del cual se realiza un ventaneo que se observa en la Figura 6 y se obtiene la caracterización de la señal.

Tabla 1. Condiciones funcionales en la unidad experimental

N.º	Tipo de condición mecánica	Código de identificación
1	Motor en óptimo funcionamiento	100
2	Falla inyector 1	200
3	Falla inyector 2	300
4	Falla inyector 3	400
5	Falla inyector 4	500
6	Falla bujía 1	600
7	Falla bujía 2	700
8	Falla bujía 3	800
9	Falla bujía 4	900
10	Falla en bobina 1-4	1000
11	Falla en bobina 2-3	1100
12	Baja presión de combustible	1200
13	Alta presión de combustible	1300
14	Árbol de admisión (+1) y escape (0)	1400
15	Árbol de admisión (-1) y escape (0)	1500
16	Árbol de admisión (0) y escape (+1)	1600
17	Árbol de admisión (0) y escape (-1)	1700
18	Árbol de admisión (+1) y escape (+1)	1800
19	Árbol de admisión (-1) y escape (-1)	1900

2.5. Reducción de atributos

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

La aplicación del método estadístico ANOVA de un solo factor, permite determinar los mejores atributos que ingresan a la matriz general mediante el análisis de los 18 atributos. Tomando en consideración en el método el mayor valor de R^2 , puesto que los valores cercanos al 100 % indican que existe un correcto ajuste de los datos al modelo, es decir, se determina la variación entre los atributos. Además, en el método se consideran los valores de p próximos a 0 que determinan si los atributos son estadísticamente significativos [12].

Respecto a la matriz de correlación, se descartaron los atributos que contienen coeficientes próximos a -1 o 1, dado que con los mismos existe una relación fuerte entre las variables, ya sea negativa (-1) o positiva (1). En efecto se seleccionaron los atributos con coeficientes próximos a cero, puesto que con estos atributos no existe una correlación fuerte entre las variables [13].

En cuanto al método de Random Forest, permite obtener la estimación de importancia de atributos con uso de los métodos de Curvature test, Standard CART e Interaction test. Posterior a ello, se aplicó el análisis de Pareto para seleccionar los atributos de mayor prioridad, considerando solo el primer 95 % de la distribución acumulada [14].

Los resultados de los métodos estadísticos aplicados: ANOVA, matriz de correlación y Random Forest se observan en la Tabla 2.

La matriz general contiene los 18 atributos correspondientes a las 19 condiciones inducidas a la unidad experimental.

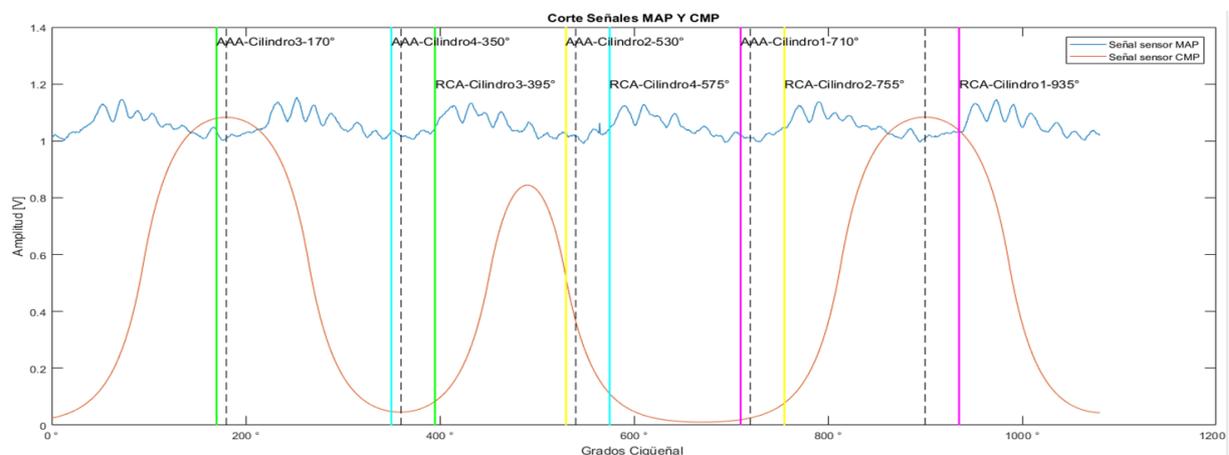


Figura 5. Corte de la señal de los sensores MAP y CMP para análisis.

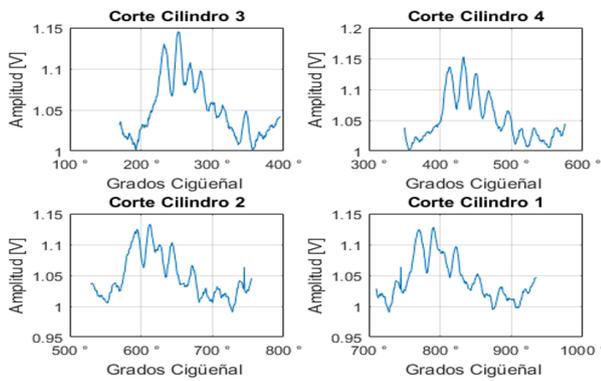


Figura 6. Ventaneo de la señal del sensor MAP por cilindro.

2.6. Selección de atributos para entrenamiento de la RNA

Para seleccionar los atributos que serán considerados en la entrada de la red neuronal se realizó un análisis de coincidencia en la Tabla 2 en el cual se seleccionaron los atributos que más se repiten entre los resultados de cada método estadístico aplicado. Los atributos que más se repiten se muestran en la Tabla 3, corroborando la efectividad de cada método utilizado.

Tabla 2. Matriz general de atributos

Métodos estadísticos		Atributos de mayor importancia de los métodos estadísticos								
Correlación	Coeff. de variación	Área	RMS	Media	Energía	Entropía	Mínimo	Mediana	Potencia	
Coefficientes analizados	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor	Rango/valor
342	$\leq \pm 0.1 / 222$	$\leq \pm 0.1 / 212$	$\leq \pm 0.1 / 216$	$\leq \pm 0.1 / 212$	$\leq \pm 0.1 / 220$	$\leq \pm 0.1 / 214$	$\leq \pm 0.1 / 204$	$\leq \pm 0.1 / 214$	$\leq \pm 0.1 / 214$	$\leq \pm 0.1 / 214$
ANOVA	Mediana	Área	Media	Mínimo	Máximo	RMS	Potencia	Energía	Entropía	
$R^2=100\%$	$R^2=99,4\%$	$R^2=99,39\%$	$R^2=99,39\%$	$R^2=99,38\%$	$R^2=99,38\%$	$R^2=99,26\%$	$R^2=99,25\%$	$R^2=99,25\%$	$R^2=99,16\%$	$R^2=99,16\%$
$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$	$p=0,00$
Forest Curvature	Energía	RMS	Entropía	Máximo	Área	Media	Potencia	Mínimo	Factor de cresta	
% de Importancia	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	
(0 a 2.5)	2,4	2,3	2,25	2,2	2,18	2,15	2	1,9	1,6	
Forest Standard Cart	Energía	Entropía	RMS	Media	Máximo	Área	Potencia	Mínimo	Coef. de variación	
% de Importancia	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	
(0 a 3)	2,85	2,7	2,65	2,64	2,63	2,6	2,55	2,46	2,4	
Forest Robust	Desviación estándar	Varianza	Energía	Área	RMS	Media	Potencia	Máximo	Mínimo	
% de Importancia	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	% Imp.	
(0 a 12)	10,15	10,13	10,11	10,09	9,5	9,1	8,7	8,5	8,4	

Tabla 3. Atributos utilizados para entrenar la RNA

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

2.7. Algoritmo de la red neuronal en Matlab

Mediante el uso de la plataforma de RNA del software Matlab se realizaron diferentes configuraciones para obtener una generalización de la red con un mínimo error.

En la Figura 7 se presenta el flujograma de la creación de la RNA.

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

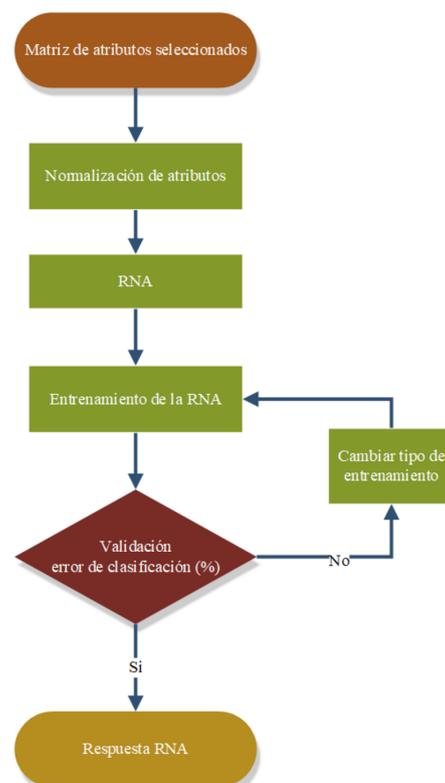


Figura 7. Flujograma de creación de RNA.

En la Figura 8 se observan los parámetros de la creación de la RNA de tipo *feed-forward backpropagation*.

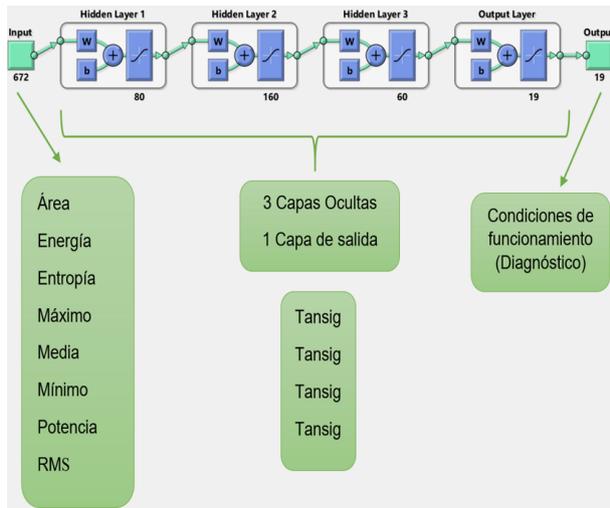


Figura 8. Estructura de red neuronal.

Una vez creada la red, se procedió a entrenar la red neuronal, y para ello se consideraron los siguientes parámetros para el entrenamiento:

1. Tipo de algoritmo
2. Numero de épocas
3. Error máximo

Con la red neuronal previamente entrenada se verificó el error de clasificación, si el error es mayor al 5 %, se procede a cambiar los parámetros para disminuir el error de clasificación.

En la Figura 9 se ilustran los errores de clasificación de diferentes configuraciones de entrenamientos obtenidos con el objetivo de conseguir la red neuronal con el menor error posible.

La red neuronal con una función de entrenamiento *trainscg* utilizada para el sistema de diagnóstico presentó un error de $1.89e^{-11}$ %.

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

Las líneas indican los valores esperados y los círculos negros representan los valores pronosticados por la RNA. La predicción determinada por la red neuronal es eficiente y se corrobora con un buen desempeño, dado que se obtiene un índice global de 1 en entrenamiento, validación y prueba lo que indica una relación lineal fuerte positiva entre las condiciones reales del MEP y los resultados proporcionados por la red neuronal [15].

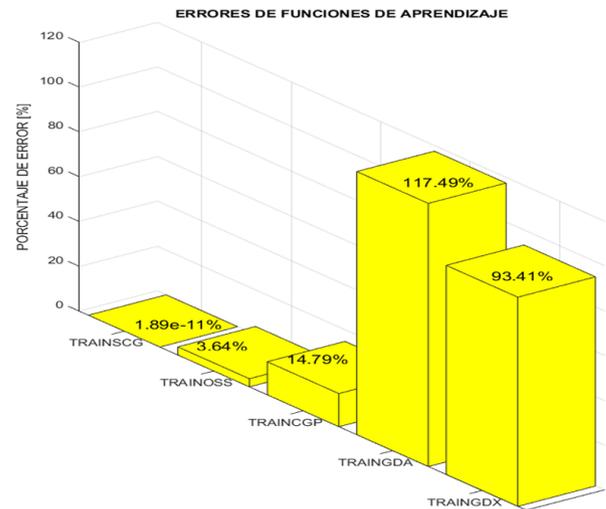


Figura 9. Errores de los diferentes algoritmos de entrenamiento.

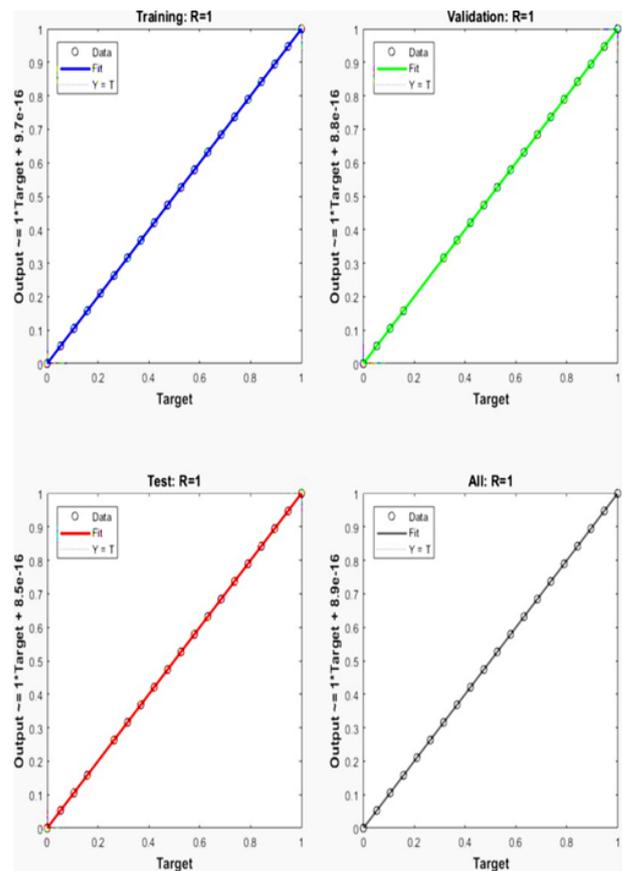


Figura 10. Correlación entre los valores esperados y pronosticados por la red neuronal.

En la Figura 11 se muestra la comparación entre la respuesta de la red neuronal con el resultado esperado, es decir, se observan las 19 condiciones mecánicas reales del motor identificadas por la red neuronal.

3. Resultados y discusión

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

En este apartado se presentan dos condiciones de falla en específico: el inyector 1 (200) y el fallo en bobina 2-3 (1100).

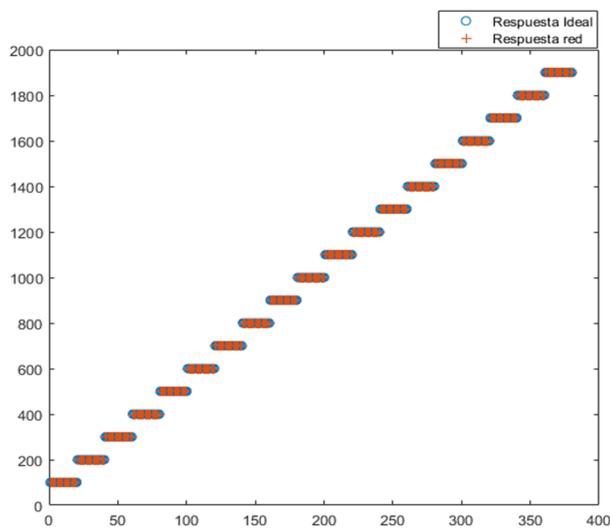


Figura 11. Red neuronal con porcentaje de error de $1.89e^{-11}$, con función de entrenamiento «trainscg».

En la Figura 12 se muestran los resultados de los valores obtenidos por la RNA para las condiciones de funcionamiento cuando el inyector 1 se encuentra con falla, y donde el valor promedio del error del resultado de la red neuronal y la condición real es 0.0127.

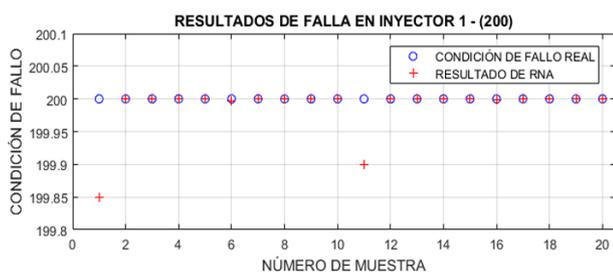


Figura 12. Resultado de condición de funcionamiento de inyector 1.

En la Figura 13 se muestran los resultados de los valores obtenidos por la RNA para condiciones de funcionamiento cuando la bobina 2-3 se encuentra con falla y el valor promedio del error del resultado de la red neuronal y la condición real es 0.0060.

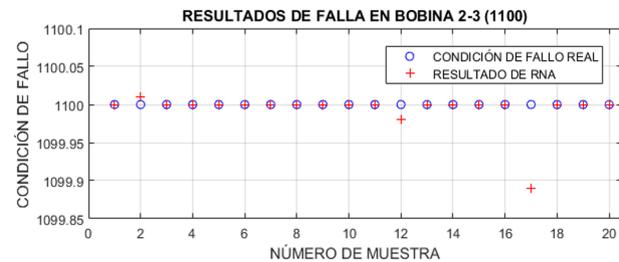


Figura 13. Resultado de condición de funcionamiento de bobina de ignición de alta tensión 2-3.

Obtenidos los resultados de las condiciones funcionales del MEP, se puede destacar que la diferencia entre las respuestas tanto de condición real y como de respuesta de red neuronal tienen un valor próximo a cero. Por lo tanto, la aplicación del sistema de diagnóstico es capaz de detectar la condición funcional de falla verdadera.

En efecto en la Figura 14 se observa que al agrupar los datos mediante el método estadístico de Tukey con un índice de confianza de 95 % de las respuestas obtenidas de la RNA y de la condición real del motor, se determina que las medias son equivalentes y no existe una diferencia estadísticamente significativa, ya que las medias de cada una de las respuestas coinciden en un valor próximo a cero.

Además, la Figura 15 de intervalos indica que no existe diferencia entre los promedios de las pruebas en las diferentes condiciones funcionales del motor.

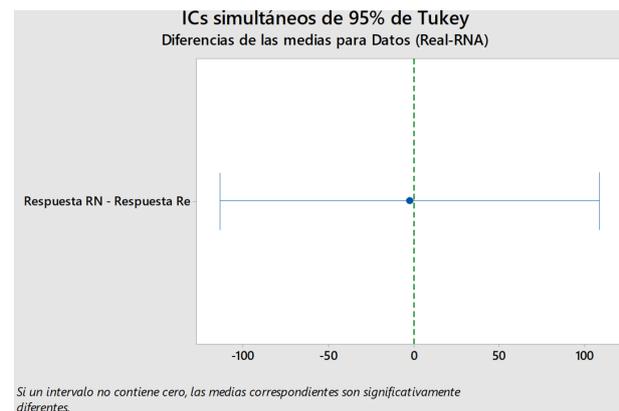


Figura 14. Gráfica de diferencias de las medias para datos de respuesta real vs. red neuronal.

Asimismo, en la Figura 16 se corrobora que existe una relación entre la respuesta esperada y de la red neuronal ya que comparten la misma letra de agrupación (A) y el valor p (p -value) es igual a 0.965. Dando como resultado un valor de confiabilidad del 96,5 %, siendo este valor muy aceptable para temas de diagnóstico de motores de combustión interna de encendido provocado.

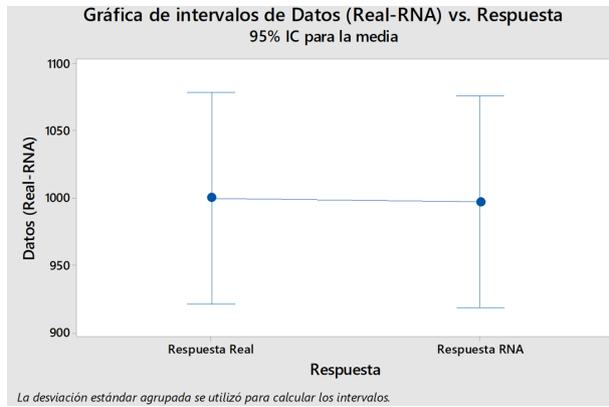


Figura 15. Gráfica de intervalos de datos de respuesta real vs. red neuronal.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Respuesta	1	597	597	0,00	0,965
Error	378	114792201	303683		
Total	379	114792798			

Comparaciones en parejas de Tukey

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

Respuesta	N	Media	Agrupación
Respuesta Real	190	1000,0	A
Respuesta RNA	190	997,5	A

Figura 16. Resultados del análisis de varianza y comparaciones en parejas de Tukey.

4. Conclusiones

El modelo de red neuronal desarrollado posee un error de clasificación de $1.89e^{-11}$ con la función de entrenamiento *trainscg*, lo que permitió la identificación precisa de los diferentes tipos de condiciones mecánicas del MEP, por lo que constituye una alternativa claramente viable para ser integrada en un sistema de diagnóstico, debido a la rapidez computacional que ofrecen las redes neuronales artificiales.

Mediante el desarrollo del análisis de varianza de un solo factor, se obtuvo un valor de p (*p-value*=0,965) demostrando que la respuesta real de clasificación de fallas mecánicas es equivalente al resultado obtenido mediante la RNA, de manera que con este valor se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa.

En este trabajo se muestra que la aplicación de redes neuronales (*feed-forward backpropagation*) es válida para la detección de condiciones de fallas mecánicas en motores de encendido provocado; además, la técnica de diagnóstico aplicada presenta la ventaja de evitar el desarmado de elementos y piezas del motor con una

técnica mínimamente invasiva fiable y de gran precisión. Para determinar los mejores atributos para el entrenamiento de la RNA se aplicó diferentes métodos estadísticos: análisis de varianza (ANOVA), matriz de correlación, Random Forest, de los cuales se agrupó los resultados en una matriz general que permitió escoger los de mayor coincidencia e importancia para la diferenciación de patrones de fallas mecánicas.

Referencias

- [1] W. Contreras, M. Arichávala, and C. Jérez, “Determinación de la presión máxima de compresión de un motor de encendido provocado basado en una red neuronal artificial recurrente,” *INGENIUS*, no. 19, pp. 9–18, 2018. [Online]. Available: <http://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.01>.
- [2] R. J. Howlett, “Condition monitoring and fault diagnosis in a domestic car engine using a neural network,” in *IEE Colloquium on Artificial Intelligence in Consumer and Domestic Products (Digest No. 1996/212)*, Oct 1996, pp. 5/1–5/4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/ic:19961142>
- [3] D. Antory, “Fault diagnosis application in an automotive diesel engine using auto-associative neural networks,” in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC’06)*, vol. 2, Nov 2005, pp. 109–116. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631454>
- [4] D. jiong Chen and P. Zhao, “Study of the fault diagnosis method based on rbf neural network,” in *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, Aug 2011, pp. 4350–4353. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010128>
- [5] Y. guo Wu, C. z. Song, and L. P. Shi, “Notice of retraction fault diagnosis of engine mission using modified elman neural network,” in *2010 Sixth International Conference on Natural Computation*, vol. 2, Aug 2010, pp. 996–998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICNC.2010.5582900>
- [6] P. Lian, T. Y. Bin, N. Ning, and C. Aiping, “Application of fuzzy neural network in fault diagnosis of gasoline engine,” in *2009 9th International Conference on Electronic Measurement Instruments*, Aug 2009, pp. 4–602–4–605. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5274658>
- [7] M. Shah, V. Gaikwad, S. Lokhande, and S. Borhade, “Fault identification for i.c.

- engines using artificial neural network,” in *2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing*, July 2011, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PACC.2011.5978891>
- [8] Y. Cay, “Prediction of a gasoline engine performance with artificial neural network,” *Fuel*, vol. 111, pp. 324–331, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.040>
- [9] Y. Çay, I. Korkmaz, A. ÇiÇek, and F. Kara, “Prediction of engine performance and exhaust emissions for gasoline and methanol using artificial neural network,” *Energy*, vol. 50, pp. 177–186, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.052>
- [10] R. F. Turkson, F. Yan, M. K. A. Ali, and J. Hu, “Artificial neural network applications in the calibration of spark-ignition engines: An overview,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 1346–1359, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.03.003>
- [11] B. D. de L. Ferreira, N. R. Araújo, R. F. Ligório, F. J. Pujatti, M. I. Yoshida, and R. C. S. ao, “Comparative kinetic study of automotive polyurethane degradation in non-isothermal and isothermal conditions using artificial neural network,” *Thermochimica Acta*, vol. 666, pp. 116–123, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.06.014>
- [12] Minitab. (2018) Minitab software. [Online]. Available: <https://goo.gl/NDoMT0>
- [13] Incibe-cert. (2015) Incibe-cert. [Online]. Available: <https://goo.gl/5h7696>
- [14] Mathworks. (2018) Mathworks. [Online]. Available: <https://goo.gl/GVhckj>
- [15] J. Calderón, B. Castillo, and J. Moreno, “Diseño de una red neuronal para la predicción del coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento,” *INGENIUS*, vol. 20, pp. 21–27, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.02>



ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN CHILLER DE ABSORCIÓN DE 1 Y 2 ETAPAS DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ONE AND TWO STAGES ABSORPTION CHILLER POWERED BY A COGENERATION PLANT

Hugo F. Zúñiga-Puebla^{1,*}, E.C. Vallejo-Coral², José Ramón Vega Galaz³

Resumen

Se han desarrollado modelos termodinámicos de enfriadores de agua por absorción de una etapa y ciclo no común de dos etapas que usan calor de desecho (de motores de combustión interna de 8,7 MW cada uno) para analizar las condiciones de operación de los equipos. Se ha realizado la comparación del sistema de una etapa con el sistema propuesto (2 etapas) en esta investigación. El coeficiente de desempeño (COP) obtenido para ambos sistemas fue el mismo, pero el calor removido del espacio refrigerado aumento de 1,3 MW (una etapa) a 1,6 MW (dos etapas) debido a que se recupera más energía residual utilizando un segundo generador. El calor residual aprovechado por el equipo de refrigeración fue de 3,8 MW y el factor de planta del proceso de cogeneración fue de 58,11 % y la capacidad de refrigeración del equipo fue de 1,623 kW. Finalmente, los ahorros económicos estimados por concepto de energía eléctrica que se tienen por poner en marcha el sistema de refrigeración por absorción que utiliza gases de escape como fuente de energía en lugar de un equipo común de refrigeración por compresión de la misma capacidad son 142 000,00 USD/año.

Palabras clave: Absorción, calor recuperado, cogeneración, COP, energía desperdiciada

Abstract

Thermodynamics models of a single and a non-common double stage ammonia-water absorption chiller that use waste heat (from three reciprocating engines of 8.7 MW each one) are developed to analyze the performance of the chiller for different operative conditions. A comparison of a single stage refrigeration system with the two stages proposed system is performed in this paper. The coefficient of performance (COP) obtained for both systems are the same, but the heat flux removed from the cooling media with the two-stage system increase from 1.3MW (single stage) until 1.6 MW due to the heat recovered increased with the second generator. The heat recovered used by the chiller was 3.8 MW, and the utilization factor of the cogeneration plant was 58.11%, and the cooling capacity of the equipment was 1,623 kW. Finally, the estimated economics savings for electric power due to the implementation of the absorption chiller that uses exhaust gases in place of a common refrigeration system by vapor compression with the same cooling capacity was 142,000.00 USD/year.

Keywords: Absorption chiller, cogeneration, heat recovery refrigeration, waste energy, COP

^{1,*}Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: hugo.zuniga@epn.edu.ec <http://orcid.org/0000-0003-0732-8108>.

²Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador. <http://orcid.org/0000-0003-2065-0484>.

³Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey ITESM, México <http://orcid.org/0000-0003-7630-2035>.

Recibido: 14-03-2018, aprobado tras revisión: 03-12-2018

Forma sugerida de citación: Zúñiga-Puebla, H. F.; Vallejo Coral, E. C. y Vega Galaz, J. R. (2019). «Análisis termodinámico de un chiller de absorción de 1 y 2 etapas de una planta de cogeneración». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 41-52. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.04>.

1. Introducción

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor son ampliamente utilizados en la industria de refrigeración. En años recientes, el escenario de demanda de energía para el enfriamiento industrial ha experimentado cambios significativos; uno de estos ha sido la prohibición del uso del clorofluorocarbono (CFC) como agente refrigerante debido a su efecto sobre la capa de ozono. Por lo tanto, se ha estudiado el uso de fluidos alternativos en sistemas de refrigeración por compresión y, actualmente, los fabricantes de estos equipos utilizan otro tipo de fluidos como por ejemplo el isobutano (R600a) [1].

Ahora, los sistemas de refrigeración por compresión presentan desventajas, entre estas se encuentran el alto consumo de electricidad, altos costos de operación y contaminación. Los sistemas de refrigeración por absorción, que son alimentados por calor en lugar de electricidad, podrían ser una buena alternativa para reducir el consumo de electricidad y obtener ganancias económicas [2–4].

Los sistemas de refrigeración por absorción (SRA) se desarrollaron para utilizar energía térmica en vez de electricidad como entrada del ciclo. De esta forma, los SRA de dos etapas se utilizan para mejorar la operación de estos sistemas [2, 5, 6]. Ambos sistemas trabajan con dos fluidos: uno refrigerante y otro que absorbe el refrigerante con el fin de incrementar la presión por medio de una bomba. Los pares más comunes de fluidos reportados en la literatura son bromuro de litio/agua (H_2O como refrigerante y LiBr como medio de transporte) y amoníaco/agua (NH_3 como refrigerante y H_2O como medio de transporte). Los sistemas amoníaco/agua se utilizan para obtener bajas temperaturas de evaporación (por ejemplo, para aplicaciones de congelación) [7]. Por lo tanto, los SRA podrían ser una buena alternativa para reducir el consumo de electricidad en el enfriamiento industrial y obtener ganancias económicas [2–4].

Colorado y Rivera [6] compararon un sistema de refrigeración por compresión de vapor con un sistema híbrido (compresión/absorción) considerando la primera y segunda leyes de la termodinámica; ellos utilizaron R134a y CO_2 como refrigerantes en el sistema de compresión, y una solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ en el ciclo de absorción. El sistema híbrido tiene un intercambiador de calor cascada, donde el condensador del sistema de compresión es el evaporador del sistema de absorción. El objetivo principal fue reducir la energía utilizada en el compresor. Los resultados de la investigación muestran que el sistema híbrido consume un 45 % menos de electricidad que el ciclo de compresión simple. Asimismo, el coeficiente de desempeño (COP) obtenido en el sistema híbrido es más alto con el R134a.

Una de las ventajas de los SRA es la posibilidad de

utilizar varias fuentes de calor como entrada al generador. Said *et al.* [8] diseñaron y construyeron un equipo de absorción con $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ que funciona con energía solar, para las condiciones climáticas de Arabia Saudí. El objetivo del sistema era producir hielo y enfriar el salón principal de un edificio, un recinto cerrado que constituye una carga de refrigeración de 10 kW. Durante la prueba, la capacidad más alta de refrigeración mostrada por el equipo fue 10,1 kW, y produjo hielo a pesar de la alta temperatura de condensación (45°C) debido a las condiciones climáticas de verano. Otros autores como Wang *et al.* [9] estudiaron las fuentes óptimas de calor para diferentes aplicaciones de SRA.

El calor desechado por los gases de escape de las calderas, motores de combustión y turbinas puede ser utilizado como una fuente de calor para un sistema de absorción. Du *et al.* [10] construyeron un prototipo de un sistema de refrigeración de amoníaco/agua de una sola etapa que utilizaba el calor desechado por un motor diésel con un método activo de tubería abierta de calentamiento, diseñado para obtener una cantidad uniforme de calor disponible. Los autores diseñaron el intercambiador de calor para recuperar la energía desechada para una capacidad específica, y combinaron los procesos de condensación y absorción en una unidad que enfriaba circulando una solución que había sido enfriada previamente.

El sistema tuvo un COP de 0,53, y una capacidad de enfriamiento de 33,8 kW para una temperatura de los gases disipados de 567°C .

En la actualidad, fabricantes como AGO están construyendo sistemas de refrigeración por absorción que pueden acoplarse con un intercambiador de calor para utilizar un colector solar o un regenerador de agua caliente por recuperación de calor (*heat recovery hot water regenerator*, HRHWG, por sus siglas en inglés) con energía de los gases de escape [11].

Este tipo de sistemas presentan diferentes ventajas comparadas con sistemas de generación de potencia; algunas de estas ventajas son: (i) eficiencia energética creciente con co/trigeneración, (ii) reducción de las emisiones de CO_2 , y (iii) sustitución de potencia eléctrica de alta calidad por energía térmica de baja calidad en la forma de calor desechado. Además, existen también motivaciones económicas como: reducción de los costos de operación al utilizar calor desechado como la fuente de energía, y uso mínimo de la electricidad.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo termodinámico de una etapa y un sistema AGO (no convencional) de dos etapas con un equipo de absorción de amoníaco/agua diseñado y construido por AGO [11] para analizar el desempeño de dicho equipo bajo diferentes condiciones de operación. El equipo de absorción utiliza energía recuperada de los gases de escape de motores de combustión interna.

1.1. Descripción del sistema completo de cogeneración

La Figura 1 muestra un esquema de una planta de cogeneración de potencia (PCP), que fue instalada por la compañía «Unión Energética del Noroeste SA de SV», y que vende electricidad y es una sucursal de la compañía «Negocio Agrícola San Enrique SA de SV». Esta última utiliza equipos para refrigerar sus productos agrícolas. Ambas compañías están en Agua Prieta, en el estado de Sonora al noroeste de México.

La PCP tiene tres motores de combustión interna con una salida total de 26,1 MW (e) (cada motor es de 8,7 MW (e) y 9,8 MW (t) se recuperan de los gases de escape y del circuito de refrigeración de alta temperatura. Un generador de vapor por recuperación de calor (*heat recovery steam generator*, HRSG, por sus siglas en inglés) recuperó 6 MW (t) produciendo vapor, y un regenerador de agua caliente por recuperación de calor recuperó 3,8 MW (t).

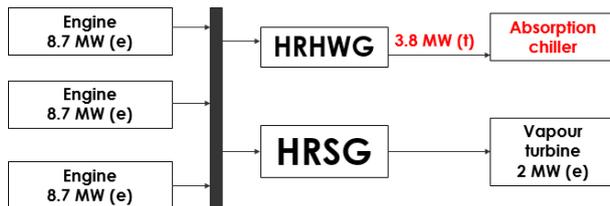


Figura 1. Planta de cogeneración de potencia bajo estudio

El vapor producido con el HRSG se utiliza en una turbina de vapor para producir 2 MW (e). El agua caliente producida en el HRHWG se utiliza como entrada a los equipos de absorción para producir aire frío para la refrigeración de almacenes donde se conservan los productos del área calurosa de Sonora.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Compresión versus absorción

Se requiere energía para transportar calor desde un bulbo de baja temperatura a otro de alta temperatura. Un fluido refrigerante experimenta una serie de transformaciones termodinámica, y cada refrigerante tiene un comportamiento único y definido, y en la medida en que dicho comportamiento es conocido, los ciclos impiden que sea necesario el reabastecimiento continuo de un refrigerante [12]. Los métodos principales de enfriamiento industrial son compresión y absorción.

El ciclo de compresión está basado en el ciclo de refrigeración convencional, en donde se transfiere calor desde el espacio que se está enfriando hacia el ambiente, utilizando energía eléctrica. El sistema de compresión tiene un condensador (unidad exterior), un evaporador (dentro del espacio que se está enfriando),

una válvula de expansión y un compresor (que transporta el refrigerante) [13]. El desempeño del sistema es alto considerando que su entrada es energía eléctrica y su salida es calor que se remueve del evaporador. Estos dispositivos trabajan incrementando y reduciendo la presión del refrigerante, cambiando su temperatura de saturación.

El ciclo de absorción utiliza una bomba y no un compresor para incrementar la presión del sistema, lo cual reduce su consumo de electricidad. Sin embargo, requiere un flujo de calor adicional en el generador, lo que hace que el desempeño de este sistema sea menor que el del sistema de compresión [3]. Este flujo de calor adicional puede provenir de fuentes de energía libre como la solar, o residuales, como el calor desechado, lo que puede ser ventajoso económicamente [5, 14]. Los pares más comunes de fluidos son bromuro de litio/agua (refrigerante) o agua/amoniaco (refrigerante).

En el acondicionamiento de espacios, el par absorbente/refrigerante más utilizado es bromuro de litio/agua. Los sistemas de absorción de una etapa requieren una fuente externa de calor a una temperatura entre 80 °C y 120 °C, y tienen un desempeño menor. La ventaja de los sistemas de absorción versus los sistemas de compresión es la posibilidad de utilizar fuentes de energía libres o residuales [5, 14].

Finalmente, otra ventaja que ofrece este tipo de dispositivo en comparación con los equipos de compresión es su nivel de sonido suave y sin vibración.

2.2. Descripción de los equipos actuales de absorción

2.2.1. Equipo de agua/bromuro de litio

El par agua/bromuro de litio es un fluido de absorción que ha sido utilizado ampliamente desde la década de 1950. Este fluido de trabajo utiliza el agua como refrigerante y está limitado a temperaturas de refrigeración por encima de 0 °C. Las máquinas de absorción basadas en agua/bromuro de litio se configuran típicamente como equipos de agua para sistemas de aire acondicionado en edificios grandes, y están disponibles en tamaños de 35 a 5000 kW.

El coeficiente de desempeño (COP) de estas máquinas, que se define como la capacidad de refrigeración dividida entre el calor de entrada, varía típicamente en el intervalo $0,7 < \text{COP} < 1,2$ en función de la configuración del ciclo. La tecnología más utilizada son los equipos por compresión de vapor, y la selección entre estos equipos de compresión y absorción depende de factores económicos [5].

2.2.2. Equipo de agua/amoniaco

El amoniaco/agua es un par de fluidos de absorción que ha sido utilizado desde finales del siglo XIX para

la producción de hielo, antes del desarrollo de la tecnología de compresión de vapor. El amoníaco es el refrigerante y el agua es el medio de transporte. Por lo tanto, el papel del agua es diferente en los pares amoníaco/agua y agua/bromuro de litio. Una ventaja del amoníaco como refrigerante es que permite trabajar con menores temperaturas porque el punto de congelación del amoníaco es $-77,7\text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, la toxicidad del amoníaco es un factor que ha limitado su uso a áreas bien ventiladas.

El punto principal para la venta de los equipos con tecnología agua/amoníaco es su capacidad de proveer aire acondicionado a gas. Las máquinas están disponibles con una capacidad entre 10 y 90 kW, con un COP entre 0.5 y 1,5. Estas unidades tienen un nicho en el mercado porque existen pocas tecnologías a gas apropiadas para múltiples aplicaciones. En particular, las aplicaciones industriales que son interesantes son las soluciones adaptadas a las necesidades del usuario que permiten utilizar calor de desecho o energía renovable [5, 12].

2.3. Sistema de una etapa

La Figura 2 muestra un sistema de absorción de una etapa (dos presiones de trabajo y una etapa de generación/absorción) que trabaja con amoníaco como refrigerante y agua como solvente. El amoníaco como refrigerante permite obtener menores temperaturas del evaporador en comparación con otras sustancias, y está disponible para una amplia variedad de aplicaciones. Por lo tanto, es uno de los refrigerantes clásicos [5, 11].

Los componentes de un sistema de refrigeración por absorción son:

- **Evaporador:** Remueve el calor del medio de enfriamiento en el equipo (solución de agua y glicol). El flujo de calor (\dot{Q}_{evap}) que se remueve evapora el refrigerante (amoníaco-NH₃) en un ambiente de baja temperatura y baja presión.
- **Deflegmador:** Es un intercambiador de calor donde ocurre la condensación parcial del vapor (rico en amoníaco) que viene del generador (1). El calor removido en este proceso permite obtener vapor puro de amoníaco que va hacia el condensador (2V), y el líquido condensado (2L) (rico en agua) retorna al rectificador por gravedad.
- **Condensador:** En la entrada de este componente, el vapor de amoníaco está a alta temperatura, y luego se condensa cuando pasa a través del intercambiador de calor (3).
- **Intercambiador de calor a gas:** Este componente es un recuperador de calor, donde se transfiere calor del amoníaco líquido que viene del condensador (3) al vapor de amoníaco que va

al absorbente. Esto ayuda a enfriar el refrigerante y aumentar el COP del sistema.

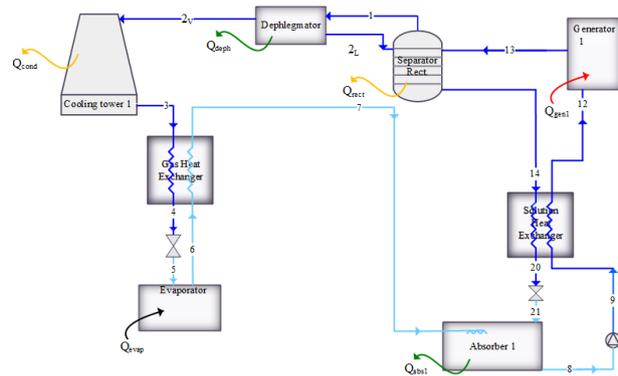


Figura 2. Sistema de absorción de una etapa

- **Válvulas de expansión:** Reducen la presión del amoníaco líquido (4) y de la solución deficiente que va al absorbente (20).
- **Absorbente:** Una solución diluida de agua de amoníaco (21) absorbe el vapor refrigerante (7). La mezcla debe enfriarse simultáneamente para diluir suficiente amoníaco en la solución, obteniendo una solución rica a la salida de este componente (8). Por lo tanto, para cumplir con este proceso es necesario remover un flujo (\dot{Q}_{abs}) de calor.
- **Bomba:** Transporta la solución rica (8), incrementando la presión del fluido que es una solución incompresible (líquida).
- **Intercambiador de calor de la solución:** Este componente es un recuperador de calor, donde la solución deficiente (14) transfiere calor a la solución rica (9) para ser precalentada.
- **Generador:** En este componente se calienta la solución rica (12), para obtener vapor con una alta concentración de amoníaco (13V), y la solución es diluida con respecto al amoníaco.
- **Rectificador:** Es una columna de fraccionamiento requerida para condensar el agua parcialmente vaporizada que sale del generador, y producir únicamente vapor de amoníaco de alta pureza (1) que va hacia el deflegmador.

El COP de un sistema de una etapa es la relación entre el flujo de calor removido en el evaporador respecto al flujo de calor que entra al generador y a la potencia consumida por la bomba, es decir:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gen1} + \dot{W}_{bomb1}} \quad (1)$$

donde:

- COP - coeficiente de desempeño
- \dot{Q}_{evap} - flujo de calor en el evaporador (kW)
- \dot{Q}_{gen1} - flujo de calor en el generador 1 (kW)
- \dot{W}_{bomba1} potencia mecánica de la bomba 1 (kW)

2.4. Sistema de dos etapas (equipo AGO)

La Figura 3 muestra el esquema del sistema estudiado en este proyecto, y la información fue obtenida de un diagrama unifilar de instalación del proyecto AGO [11]. La figura muestra los componentes principales del sistema de refrigeración y de los sistemas auxiliares.

El sistema de refrigeración estudiado no es el ciclo de absorción de dos etapas y que es comúnmente descrito en la literatura [1, 5]. Este tiene dos etapas de procesos de generación y absorción, donde el vapor rico en amoníaco sale únicamente del generador 1 (13) al deflegmador; y la solución líquida sale del rectificador (14) y va al generador 2, donde se le agrega calor a la solución. Como resultado, después del separador 2, el estado (17) absorbe mayor cantidad de amoníaco. Asimismo, se obtiene una solución deficiente (20) que va al absorbente 2 y al absorbente 1, respectivamente.

El objetivo principal de este equipo de dos etapas es recuperar más energía del agua caliente para suministrarla a los fluidos de trabajo del sistema de refrigeración. En este proyecto, se realiza una comparación de modelos termodinámicos para un sistema de refrigeración por absorción de una etapa (Figura 2) y un sistema de doble etapa (Figura 3).

El COP de un sistema de doble etapa está dado por la relación entre el flujo de calor removido en el evaporador respecto al calor consumido en los generadores y la potencia mecánica requerida por las bombas, Ec. (2), es decir:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gen1} + \dot{Q}_{gen2} + \dot{W}_{bomba1} + \dot{W}_{bomba2}} \quad (2)$$

donde:

- COP - coeficiente de desempeño
- \dot{Q}_{evap} - flujo de calor en el evaporador (kW)
- \dot{Q}_{gen1} - flujo de calor en el generador 1 (kW)
- \dot{Q}_{gen2} - flujo de calor en el generador 2 (kW)
- \dot{W}_{bomba1} - potencia mecánica de la bomba 1 (kW)
- \dot{W}_{bomba2} - potencia mecánica de la bomba 2 (kW)

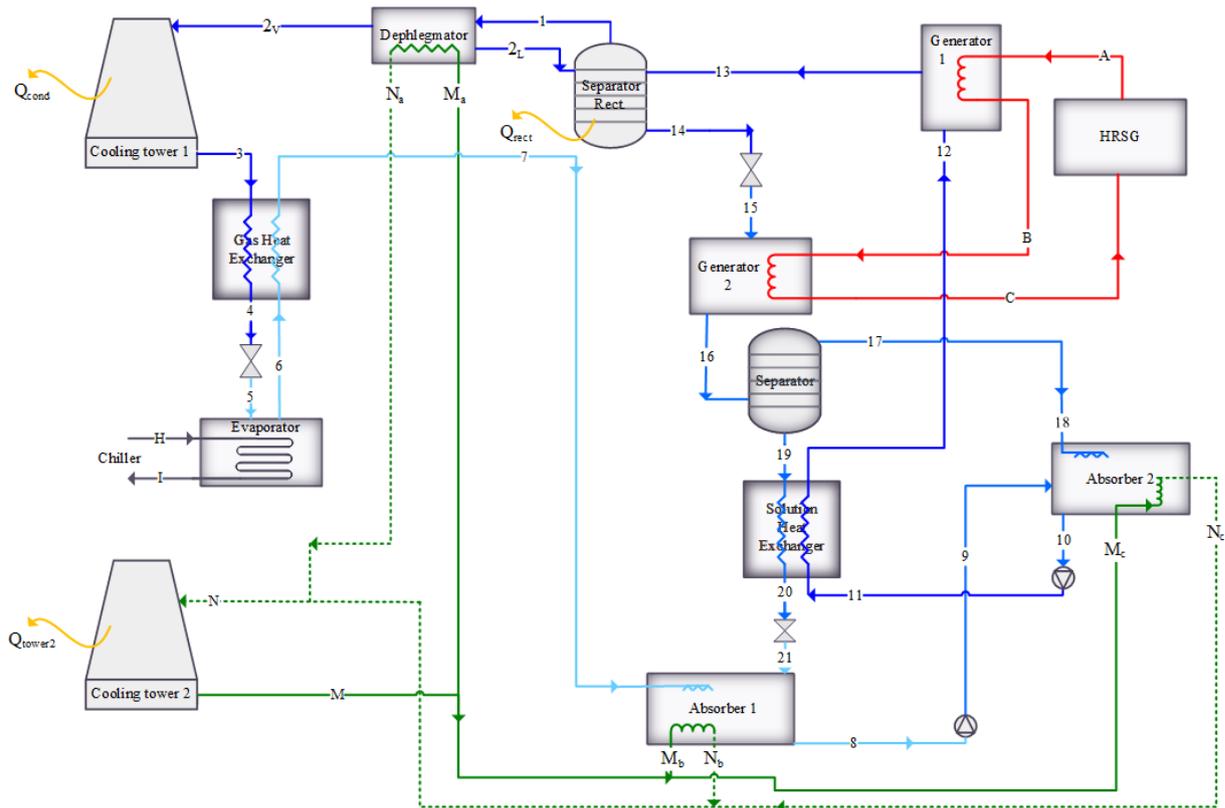


Figura 3. Elementos necesarios para la toma de muestras.

2.5. Sistemas auxiliares

En la Figura 3 se muestran los sistemas auxiliares que se describen a continuación y que interactúan con diferentes componentes del sistema de absorción:

- **HRHWG:** Es un intercambiador de calor que utiliza la energía desechada por el motor para producir agua caliente. En este caso, el agua caliente (A) a 110 °C entra en el generador 1, entrega calor a la solución amoníaco/agua y sale por (B) a 86 °C. Esta agua continúa hacia el generador 2 donde intercambia calor con la solución, y sale por (C) a 80 °C. En condiciones normales de operación, el flujo volumétrico de agua es 120 m³/h.
- **Evaporador del chiller:** El calor absorbido por el refrigerante (NH₃) en el evaporador se remueve de una solución (glicol-agua). En este sistema, el glicol entra en (H) a -2 °y sale por (I) a -8 °C. La simulación realizada en este proyecto ayuda a determinar el flujo másico de solución de glicol que puede ser enfriada por este equipo.
- **Torre de enfriamiento 1:** En el condensador el refrigerante necesita expulsar calor, lo cual ocurre en esta torre enfriada por agua y aire, con una capacidad de 1250 kW.
- **Torre de enfriamiento 2:** El calor expulsado en el absorbente 1, absorbente 2 y deflegmador, evapora el amoníaco (M) y ese vapor va a la torre de enfriamiento 2 para condensarse y continuar el proceso. La capacidad de esta torre es de 3750 kW.

El flujo de calor que se intercambia con el sistema de refrigeración en el HRHWG y en el equipo evaporador se calcula directamente usando la Ec. (3).

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad (3)$$

donde:

- \dot{Q} - flujo de calor en el intercambiador (kW)
- \dot{m} - flujo másico de agua (kg/s)
- c_p - calor específico del agua (kJ · kg/°C)
- ΔT - diferencia de temperatura (°C)

El flujo de calor removido por las torres de enfriamiento son datos de entrada para el modelo del sistema de refrigeración desarrollado en este proyecto. Las capacidades caloríficas de las torres de enfriamiento se utilizan como parámetros de este modelo, y los procesos termodinámicos y de transferencia de calor pueden analizarse detalladamente en trabajos futuros.

3. Desarrollo del modelo

3.1. Análisis termodinámico

El modelo fue desarrollado usando EES (*Engineering Equation Solver*) [15], debido a que este software tiene una rutina externa para conocer las propiedades de la solución amoníaco-agua y de la mezcla de gases. Para realizar el estudio termodinámico de los sistemas presentados en la Figura 2 y en la Figura 3, se desarrolló una metodología apropiada para cada componente, tal como se explica a continuación:

- **Generador:** La masa total, masa de amoníaco y el balance de energía, se expresan respectivamente con las Ec. (4), Ec. (5), y Ec. (6).

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13V} + \dot{m}_{13L} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{12} \times x_{12} = \dot{m}_{13V} \times x_{13V} + \dot{m}_{13L} \times x_{13V} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{12} \times h_{12} + \dot{Q}_{gen1} = \dot{m}_{13V} \times h_{13V} + \dot{m}_{13L} \times h_{13V} \quad (6)$$

donde:

- \dot{m}_{12} - flujo másico de la mezcla de gases (kg/s)
- \dot{m}_{13V} - flujo másico de la mezcla de gases (kg/s)
- \dot{m}_{13L} - flujo másico de la solución (líquido) (kg/s)
- x_{12} - fracción de la masa de amoníaco en el generador 1
- x_{13V} - fracción de la masa del vapor de amoníaco
- h_{12} - entalpía específica de la mezcla de gases en el generador 1 (kJ/kg)
- \dot{Q}_{gen1} - flujo de calor del generador 1 (kW)
- h_{13V} - entalpía específica del amoníaco en el generador 1 (kJ/kg)

A partir de esta sección es importante notar que la cantidad de calor suministrada a la solución agua-amoníaco que fluye a través del generador es igual al calor entregado por el HRHWG definido por la Ec. (7).

$$\dot{Q}_{gen1_{HRHWG}} = \dot{m}_A \times c_p \times (T_A - T_B) \quad (7)$$

donde:

- $\dot{Q}_{gen1_{HRHWG}}$ - flujo de calor en el HRHWG (kW)
- \dot{m}_A - flujo másico de agua (HRHWG) (kg/s)
- c_p - calor específico del agua (kJ*kg/°C)
- T_A - temperatura de entrada al generador 1 (°C)
- T_B - temperatura de salida del generador 1 (°C)

Los balances de masa y energía para el generador 2 se realizaron bajo los mismos criterios.

- **Rectificador:** Se realizaron balances de masa y energía, con la particularidad que el rectificador disipa calor al ambiente como respuesta a su participación en la condensación de la solución vaporizada de amoníaco-agua que viene del generador. Este elemento lleva a cabo la separación de las fases líquida y gaseosa de la solución amoníaco que fluye a través de él. El rectificador es una columna de fraccionamiento necesaria para condensar el agua parcialmente vaporizada que sale del generador, y obtener únicamente amoníaco-vapor de muy alta pureza (1) que va al deflegmador.
- **Deflegmador:** El calor se transfiere al sistema auxiliar de amoníaco, para asegurar que el refrigerante retorna como vapor a la torre de enfriamiento 2. El flujo de calor removido está dado por la Ec. (8).

$$\dot{Q}_{def} = \dot{m}_{Ma} \times (h_{Na} - h_{Ma}) \quad (8)$$

donde:

- \dot{Q}_{deph} - flujo de calor al deflegmador (kW)
- \dot{m}_{Ma} - flujo másico de amoníaco en el deflegmador (kg/s)
- h_{Na} - entalpía específica del amoníaco que sale (kJ/kg)
- h_{Ma} - entalpía específica del amoníaco que entra (kJ/kg)

- **Condensador:** el calor removido del vapor de amoníaco a la entrada es liberado hacia la atmósfera en la torre de enfriamiento.
- **Intercambiador de calor a gas:** En el balance de energía se determinan primero las capacidades caloríficas de los fluidos que entran al intercambiador de calor utilizando las propiedades caloríficas específicas del amoníaco, para luego obtener el calor recuperado por el vapor de amoníaco que va al absorbente 1. Luego se identifica la capacidad calorífica mínima, así como la mayor diferencia de temperatura. De esta manera, el máximo flujo de calor que puede transferirse será igual al producto de la capacidad calorífica mínima y la mayor diferencia de temperatura. Finalmente, la efectividad del intercambiador de calor está dada por la Ec. (9).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{recupGHX}}{\dot{Q}_{max}} \quad (9)$$

donde:

ε - efectividad del intercambiador de calor

- $\dot{Q}_{recupGHX}$ - flujo del intercambiador de calor a gas (kW)
- \dot{Q}_{max} - máximo flujo de calor del GHX (kW)

El balance de energía para el intercambiador de calor de solución se realizó bajo los mismos criterios, con la única diferencia que el intercambio de calor en el SHX ocurre de la solución rica a la solución deficiente.

- **Válvulas de expansión:** Para estos componentes se suponen flujo másico y entalpía constante.
- **Evaporador:** El calor que pierde la mezcla de glicol-agua (medio de enfriamiento) es igual al calor ganado por el refrigerante (amoníaco) que circula a través del evaporador. El flujo de calor en el evaporador se calcula con la Ec. (10).

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{glicol} \times c_{p-propileno} \times (T_H - T_I) \quad (10)$$

donde:

- \dot{Q}_{evap} - flujo de calor del equipo (kW)
- \dot{m}_{glicol} - flujo másico de glicol (kg/s)
- T_H - temperatura a la entrada del equipo (°C)
- T_I - temperatura a la salida del equipo (°C)
- $C_{p-propileno}$ - calor específico de la mezcla glicol-agua (kJ · kg/°C)

- **Absorbente:** El calor perdido por la mezcla amoníaco-agua en el absorbente 1 es tomado por el sistema de refrigeración auxiliar mencionado en la sección correspondiente al deflegmador, y es el mismo proceso en el absorbente 2. El flujo de calor perdido en el absorbente está dado por la Ec. (11).

$$\dot{Q}_{abs1} = \dot{m}_{Mb} \times (h_{Nb} - h_{Mb}) \quad (11)$$

donde:

- \dot{Q}_{abs1} - flujo de calor en el absorbente 1 (kW)
- \dot{m}_{Mb} - flujo másico de amoníaco en el absorbente 1 (kg/s)
- h_{Nb} - entalpía específica del amoníaco en la salida del absorbente 1 (kJ/kg)
- h_{Mab} - entalpía específica del amoníaco en la entrada del absorbente 1 (kJ/kg)

El deflegmador y ambos absorbentes proporcionan el calor utilizado por el sistema de refrigeración auxiliar.

- **Bomba:** Para calcular la energía requerida por la bomba se inicia con la fórmula que describe la potencia absorbida por una bomba, considerando el volumen específico y la diferencia de presión. Esto es igual al trabajo de la bomba como un cambio de entalpía, Ec. (12).

$$\dot{W}_{bomba1} = \dot{m}_8 \times (h_9 - h_8) \quad (12)$$

Where:

\dot{W}_{bomba1} - potencia mecánica de la bomba (kW)

\dot{m}_8 - flujo másico de la solución (kg/s)

h_9 - entalpía específica de la solución en la salida de la bomba 1 (kJ/kg)

h_8 - entalpía específica de la solución en la entrada de la bomba 1 (kJ/kg)

El sistema de refrigeración analizado presenta dos etapas de absorción y generación, que difieren del ciclo comúnmente utilizado por la industria (de una etapa). Por esta razón, se simularon dos tipos de ciclos en EES [15] con las mismas condiciones operacionales como data de entrada.

3.2. Data de entrada al modelo

La data de entrada fue definida basándose en las condiciones operacionales de diseño. La alta presión del equipo es 1,700 kPa, la temperatura del amoníaco en el evaporador es -12 °C. En consecuencia, la baja presión corresponde a la presión de saturación (267,9 kPa).

El HRHWG entrega $120 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua a los generadores a 108 °C, y el sistema de generación baja la temperatura del agua a 80 °C. En el evaporador, la temperatura del refrigerante del equipo (agua y glicol) se reduce en 6 °C.

El análisis termodinámico se ha realizado enfocado en la solución amoníaco-agua y en la concentración de la mezcla de gases. Los valores comunes de concentración para una solución rica están entre 0,35 y 0,45 [14, 16]. La concentración de la solución en la entrada del generador 2 corresponde a una concentración media (x_{media}), que ha sido definida como una función de la capacidad de las torres de enfriamiento (1,250 kW and 3,750 kW). La concentración media es 0.36, como se muestra en la Figura 4.

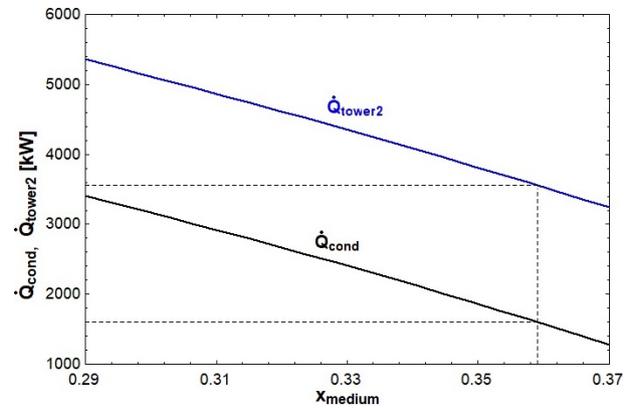


Figura 4. Flujo de calor del condensador y la torre de enfriamiento 2 vs. concentración media de la solución

3.3. Factor de utilización de la PCP

El factor de utilización de una planta de cogeneración es el cociente de las potencias de salida (energías térmica y eléctrica) con respecto al calor total que entra a la PCP, (Ec. (13)).

$$\epsilon_u = \frac{\dot{Q}_{gen1} + \dot{Q}_{gen2} + \dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{entrada}} \quad (13)$$

Where:

ϵ_u - factor de utilización de la PCP

\dot{Q}_{gen1} - flujo de calor del generador 1 (kW)

\dot{Q}_{gen2} - flujo de calor del generador 2 (kW)

$\dot{Q}_{entrada}$ - calor total que entra a la PCP (kW)

\dot{Q}_{gen} es la energía térmica recuperada para ser utilizada como calor de proceso en el equipo. \dot{W}_{neto} es la potencia neta obtenida en las turbinas de gas y de vapor, y \dot{Q}_{input} es el calor total que entra, que corresponde a la energía calorífica consumida por los motores de combustión interna.

3.4. Ahorro económico con respecto a un sistema de refrigeración por compresión de vapor

La reducción del consumo de potencia eléctrica con el SRA respecto a un sistema de refrigeración por compresión de vapor permite obtener ahorros económicos. Estos ahorros han sido calculados comparando con un sistema de refrigeración por compresión de vapor de la misma capacidad de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento trabaja las 24 horas del día, pero de acuerdo con sus características principales puede suponerse que el factor de utilización es menor que uno porque el compresor empieza a trabajar justo cuando la temperatura se eleva por encima de cierto límite; por lo tanto, como data de campo experimental, puede ajustarse a 50 %.

4. Resultados y análisis

4.1. Resultados del modelo

El ciclo de dos etapas permite recuperar de mejor manera la energía del agua HRHWG. Por esta razón, la temperatura de la solución en la entrada del generador principal se incrementa, y es posible obtener un flujo de solución más rica con el mismo calor disponible del agua.

Tabla 1. Comparación de los ciclos de una etapa vs. dos etapas

	Unidades	Dos etapas	Una etapa
Calor recuperado en el GEN 1	[kW]	2,954	2,954
Calor recuperado en el GEN 2	[kW]	800	—
Temperatura de la solución a la entrada del generador 1	[°C]	75	65
Capacidad evaporador COP	[kW] —	1,6 0.44	1,3 0.44

Tal como se muestra en la Tabla 1, al agregar una segunda etapa de absorción y generación al ciclo de absorción de una etapa, se incrementa en un 23 % la capacidad de refrigeración. El COP es similar para ambos sistemas (una y dos etapas), pero si se considera que el calor que entra al sistema de refrigeración de dos etapas fue recuperado de energía desechada, es más ventajoso incluir una etapa adicional del generación y absorción para incrementar la capacidad de enfriamiento.

La concentración de la solución a la entrada del generador 2, es la variable que más influye en el modelo. Cuando presenta valores menores a 0,36, el COP del sistema se incrementa debido a que aumenta el flujo de amoníaco proveniente del generador 2, tal como se muestra en la Figura 5. En consecuencia, la capacidad del evaporador mejora, manteniendo constante el calor requerido por los generadores de amoníaco.

La disponibilidad de calor es un aspecto fundamental, y depende de las condiciones de operación del motor. Si el motor está trabajando a la máxima carga (máxima capacidad de HRSG y HRHWG), el generador 2 produce un mayor flujo de amoníaco, y el sistema de refrigeración alcanza su capacidad máxima (1,600 kW), con un COP de 0.43. El COP se mantiene constante a pesar de que el calor recuperado disminuye y la capacidad del evaporador se reduce como se muestra en la Figura 6.

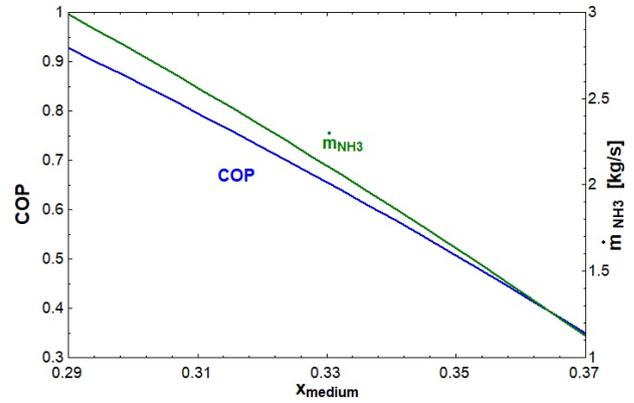


Figura 5. COP y flujo másico de refrigerante respecto a la concentración media de la solución

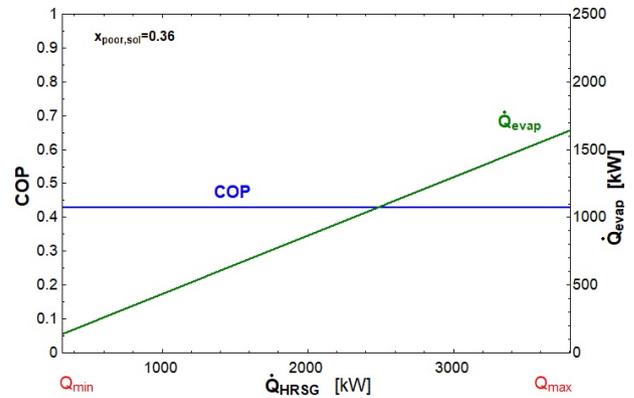


Figura 6. COP y flujo de calor en el evaporador respecto al calor recuperado en la PCP

La presión alta del sistema es una condición de operación esencial, y está definida por la geografía donde el equipo está instalado, debido a la altitud. Si el sistema de absorción opera a nivel del mar, la capacidad del evaporador se incrementa y mejora el COP porque el calor requerido por los generadores de amoníaco permanece constante, tal como se muestra en la Figura 7. Si la presión alta sube, aumenta la capacidad de la torre de enfriamiento (requerida para disipar calor de los separadores, absorbentes y deflegmador). Por esta razón, la capacidad de la torre de enfriamiento debe diseñarse, según las condiciones operacionales *in situ*.

La efectividad de los intercambiadores de calor fue considerada constante e igual a 0.8 [17]. El intercambiador de calor de solución permite recuperar calor dentro del ciclo, e incrementa la temperatura de la solución amoníaco-agua antes de que entre al generador principal. La efectividad del SHX es directamente proporcional al flujo de calor del evaporador y al COP del sistema, como puede verse en la Figura 8. Un SHX de mayor efectividad representa un alto costo de inversión, y debe ser evaluado considerando que el COP y la capacidad de enfriamiento también se incrementan.

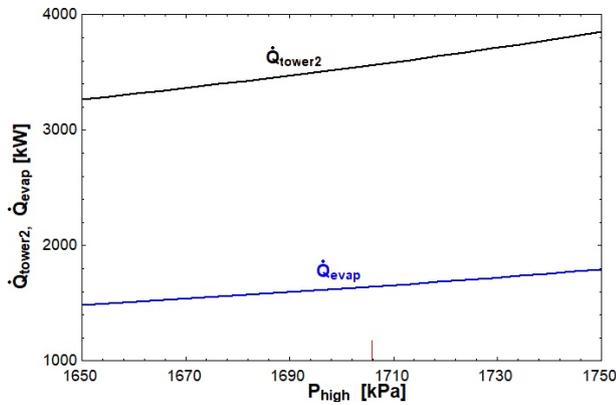


Figura 7. Flujo de calor en la torre de enfriamiento 2 y en el evaporador respecto a la presión alta del sistema

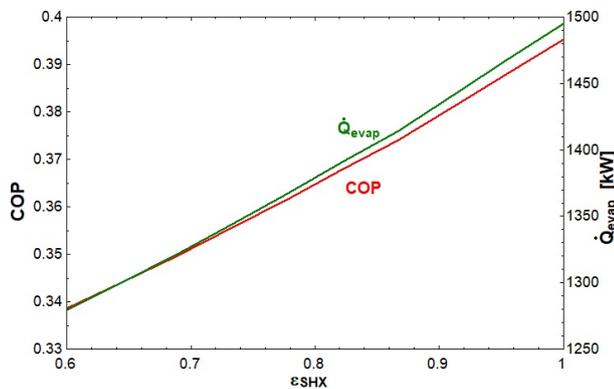


Figura 8. COP y flujo de calor en el evaporador respecto a la efectividad del SHX

4.2. Factor de utilización de la PCP

\dot{Q}_{gen} es el calor recuperado para usar la energía desechada en el equipo, y es igual a 3,8 MW (t) (obtenida por el modelo). El \dot{W}_{neto} es 28,1 MW (e) y corresponde a la potencia neta de los motores de combustión interna (8,7 MW (e) por motor) y de la turbina de vapor (2 MW(e)). \dot{Q}_{input} se calcula como muestra la Ec. (14), con la información técnica del fabricante de los motores Roll Royce, que reporta 7,572 kJ/kWh de consumo específico de energía. El factor de utilización para el proceso se calcula con la ecuación (13) y el resultado se muestra en la Ec. (15).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{entrada} &= 3 \times 8,700 \text{ kW}(e) \left(\frac{7,572 \text{ kJ}(f)}{1 \text{ kWh}(e)} \right) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ \dot{Q}_{entrada} &= 54,897 \text{ kW}(f) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\epsilon_u = \frac{3,8 \text{ MW} + (2 + 8,7 \times 3) \text{ MW}}{54,897 \text{ MW}} = 0,5811 \quad (15)$$

El flujo de calor que entra a la PCP es kW(f), donde f representa la energía del combustible.

El factor de utilización del proceso de cogeneración es 58,11 %, lo cual significa que el proceso está utilizando un alto porcentaje de la energía del combustible consumido por los motores de combustión interna.

4.3. Estimación del ahorro económico

La capacidad de enfriamiento del sistema de absorción refrigeración (AGO) de dos etapas fue calculada con el modelo, resultando un valor de 1,623 kW (t). Para conocer el ahorro económico, en esta sección se calcula la electricidad que consumiría un equipo común de compresión de vapor.

El mercado ofrece muchos tipos de máquinas que utilizan el ciclo de compresión de vapor para refrigerar. El COP promedio es 4,5 [18]. Por lo tanto, es posible calcular la potencia mecánica \dot{W}_{comp} requerida por el compresor dada por la Ec. (16).

$$\dot{W}_{comp} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{COP} = \frac{1,623 \text{ kW}}{4,5} = 360,67 \text{ kW}(e) \quad (16)$$

El factor de utilización de un equipo de compresión fue definido como 50 % en la sección 3.4. Si se consideran 24 horas al día y 365 días por año, el consumo anual de electricidad del sistema de compresión es 1 579 734,60 kWh/año.

Considerando un costo promedio unitario de la energía (obtenido del costo mensual de electricidad de la tarifa industrial para el último año en Agua Prieta/México [19]) de 0,09 USD/kWh, el costo de electricidad evitado por el sistema de cogeneración sería 142 000,00 USD/año, aproximadamente.

Sin embargo, si se consideran los posibles ahorros y se fija un tiempo de 5 años para recuperar el dinero, la inversión inicial podría estar alrededor de 710 000,00 USD. Esto significa que la inversión es rentable. Para obtener resultados más precisos, es necesario adquirir data específica.

La cogeneración eficiente tiene múltiples incentivos fiscales y preferencia en el despacho de energía en diferentes países (por ejemplo, México), debido a la contribución de la tecnología en la preservación del ambiente.

5. Conclusiones

Es conveniente utilizar un sistema de absorción de dos etapas, debido a que permiten explotar mejor el calor disipado por los motores. Asimismo, los COP de ambos sistemas (de una y de dos etapas) son similares.

La concentración de la solución a la salida del generador 1 es la variable con más influencia en los resultados del ciclo. Por esta razón, esta variable fue

elegida de acuerdo con la capacidad de las torres de enfriamiento instaladas. Además, se observó que si la concentración está cercana a 0,3, el COP del sistema está cercano a 1 mientras que se logran mayores valores de concentración.

El COP se mantiene constante, independientemente de la cantidad de flujo de calor que entra al sistema. Si se le suministra al generador una mayor cantidad de calor, aumenta el flujo másico de amoníaco que va al evaporador, y consecuentemente la capacidad de refrigeración del equipo se incrementa.

El proceso de cogeneración utilizando gases de escape como fuente de calor para un equipo de refrigeración por absorción puede proporcionar conservación del ambiente y beneficios económicos.

Referencias

- [1] ASHRAE, *Handbook - Fundamentals. 2009*, inch-pound ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/X11TGj>
- [2] C. Moné, D. Chau, and P. Phelan, “Economic feasibility of combined heat and power and absorption refrigeration with commercially available gas turbines,” *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 13, pp. 1559–1573, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00157-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00157-6)
- [3] J. Rodríguez-Muñoz and J. Belman-Flores, “Review of diffusion-absorption refrigeration technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 145–153, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.019>
- [4] K. Ullah, R. Saidur, H. Ping, R. Akikur, and N. Shuvo, “A review of solar thermal refrigeration and cooling methods,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 499–513, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.024>
- [5] K. E. Herold, R. Radermacher, and S. A. Klein, *Absorption Chillers and Heat Pumps*. CRC Press, 2016, ch. 10. Two-Stage Ammonia/Water Systems, pp. 215–232. [Online]. Available: <https://goo.gl/MrMG2m>
- [6] D. Colorado and W. Rivera, “Performance comparison between a conventional vapor compression and compression-absorption single-stage and double-stage systems used for refrigeration,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 87, pp. 273–285, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.029>
- [7] M. Conde, *Thermophysical properties of NH₃ + H₂O Solutions for the industrial design of absorption refrigeration equipment*, Formulation for industrial use. M. Conde Engineering. p. 11. 2004.
- [8] S. Said, K. Spindler, M. El-Shaarawi, M. Siddiqui, F. Schmid, B. Bierling, and M. Khan, “Design, construction and operation of a solar powered ammonia-water absorption refrigeration system in Saudi Arabia,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 62, pp. 222–231, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.026>
- [9] Y. Wang, C. Wang, and X. Feng, “Optimal match between heat source and absorption refrigeration,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 102, pp. 268–277, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.11.003>
- [10] S. Du, R. Wang, and X. Chen, “Development and experimental study of an ammonia water absorption refrigeration prototype driven by diesel engine exhaust heat,” *Energy*, vol. 130, pp. 420–432, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.006>
- [11] AGO AG. (2017) Cooling from waste heat: efficient energy supply – from small to large-scale industrial projects. AGO AG Energie + Anlage. [Online]. Available: <https://goo.gl/id5TYk>
- [12] V. Chakravarthy, R. Shah, and G. Venkatarathnam, “A review of refrigeration methods in the temperature range 4–300 K,” *ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 020801–020819, 2011. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1115/1.4003701>
- [13] R. J. Dossat, *Principios de Refrigeración*. Compañía Editorial Continental, 1980. [Online]. Available: <https://goo.gl/CG3Tbg>
- [14] P. Srikuhirin, S. Aphornratana, and S. Chongpaibulpatana, “A review of absorption refrigeration technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, no. 4, pp. 343–372, 2001. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00003-X)
- [15] F-chart software. (2016) Engineering Equation Solver (EES). [Online]. Available: <https://goo.gl/sYqcRc>
- [16] Y. Fan, L. Luo, and B. Souyri, “Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 1758–1775, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.01.007>

-
- [17] S. Steiu, D. Salavera, J. C. Bruno, and A. Coronas, “A basis for the development of new ammonia–water–sodium hydroxide absorption chillers,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 4, pp. 577–587, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.02.017>
- [18] F. Kreith, S. Wang, and P. Norton, *Air conditioning and refrigeration engineering*. CRC Press, 1999. [Online]. Available: <https://goo.gl/675PxJ>
- [19] SENER. (2017) Precios medios de energía eléctrica por tipo de tarifa. Secretaría de Energía. México. [Online]. Available: <https://goo.gl/sz22NF>



NEXO AGUA – ENERGÍA: ANÁLISIS DEL FLUJO HÍDRICO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA CODO SINCLAIR

THE WATER-ENERGY NEXUS: ANALYSIS OF THE WATER FLOW OF THE COCA CODO SINCLAIR HYDROELECTRIC PROJECT

Sebastián Jiménez-Mendoza¹, Francisco Terneus-Páez^{1,2,*}

Resumen

Este artículo analiza la interrelación existente entre el agua y la energía, tomando como caso el análisis del flujo hídrico del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. Investiga el caso de este proyecto emblemático, donde los usos consuntivos del agua disminuirían el caudal de entrada al túnel de conducción, arriesgando con esto su capacidad de generación eléctrica. Se utiliza para ello una investigación de tipo bibliográfica. Se concluye que el proyecto Chalpi Grande y las fases siguientes de ríos orientales; y los proyectos de riego Cayambe-Pedro Moncayo y de agua potable Pesillo-Imbabura afectarían el caudal de entrada hasta en un 11 % y con ello su producción de energía, con lo cual queda en evidencia la necesidad de planificar el aprovechamiento de estos recursos considerando su nexo.

Palabras clave: Nexo agua – energía, Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, uso consuntivo del agua.

Abstract

This article analyzes the interrelation between water and energy, taking as a case the analysis of the water flow of the Coca Codo Sinclair Hydroelectric Project. Investigate the case of this emblematic project, where the water uses of consumption would decrease the inflow to the driving tunnel, which would risk its power generation capacity. Bibliographic research is used for this purpose. It is concluded that the Chalpi Grande project and the following phases of the Rios Orientales; and the Cayambe Pedro Moncayo irrigation projects and the Pesillo Imbabura potable water would affect the flow of inputs of the hydroelectric project by up to 11% and, therefore, their energy production, demonstrating the need to plan the use of these resources considering their nexus.

Keywords: Water-energy nexus, Coca Codo Sinclair Hydroelectric Project, consumptive use of water.

^{1,*}Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
<http://orcid.org/0000-0001-7031-5954>

²Programa de Doctorado en Gestión Tecnológica – Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: cferneus@espe.edu.ec <http://orcid.org/0000-0001-5372-0288>

Recibido: 02-10-2018, aprobado tras revisión: 30-11-2018

Forma sugerida de citación: Jiménez-Mendoza, S. y Terneus-Páez, F. (2019). «Nexo agua – energía: Análisis del flujo hídrico del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 53-62. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.05>.

1. Introducción

El nexo entre el agua-energía-alimentos ha entrado en debate desde la Conferencia de Bonn del 2011 en la cual se recomendó que estos recursos se consideren de manera integradora, y centrándose en asegurar que las interdependencias entre estos estén explícitamente identificadas en la toma de decisiones [1]. Tres años más tarde, durante la conferencia del *Global Water Security & Sanitation Partnership* (GWSP), las comunidades de investigación y políticas de todo el mundo emitieron un llamado para desarrollar estrategias que aborden un enfoque de nexo completo [2]. Con la actual tasa de crecimiento de la población mundial, el sector agrícola enfrenta el desafío de duplicar la producción de alimentos para 2050 [3]. Alrededor del 71 % de las extracciones de agua del mundo se atribuyen al sector agrícola [4]. Para el 2050 se necesitará un aumento del 55 % en la demanda mundial de agua para abordar el aumento de la generación de electricidad y uso doméstico, se proyecta que más del 40 % de la población mundial vivirá bajo estrés hídrico severo [5]. Sin embargo, muy pocos autores han abordado la cuestión de cómo traducir este concepto del nexo agua-energía-alimentos, que es principalmente teórico, en enfoques prácticos de evaluación. Albrecht et al. [6] afirman que, a pesar del enfoque conceptual prometedor, el uso del nexo agua-energía-alimentos como herramienta analítica para evaluar sistemáticamente las interconexiones de estos recursos ha sido limitado. Middleton et al. [7] menciona que el nexo agua-energía-alimento aún no se ha integrado en la práctica. Del mismo modo, Leck et al. [8] solicita la aplicación práctica del nexo agua-energía-alimento en las futuras investigaciones científicas.

Denise Lofman et al. [9] consideran que el nexo entre el agua y la energía presentarán dificultades de equilibrar las necesidades de los usuarios y proteger recursos valiosos a la vez, esto referente a temas agrícolas, industriales y residenciales. Pittock Jamie et al. [10] muestran como el nexo entre el suministro de energía hidroeléctrica y el suministro de alimento influye considerablemente en la cuenca aportante de agua. Según Fisher, J. et al. [11] el nexo agua-energía para la generación de electricidad trae problemas más severos como la contaminación y la emisión de CO₂. Lubega et al. [12] afirma que es posible medir el nexo agua-energía mediante modelos entre la energía eléctrica y el consumo municipal de agua. Varias tendencias actuales aumentan aún más la urgencia de abordar el nexo agua-energía de una manera integrada y proactiva. En primer lugar, el cambio climático ya ha comenzado a afectar los patrones de precipitación y temperatura. En segundo lugar, el crecimiento de la población, y las tendencias de migración regional indican que es probable que aumenten habitantes en zonas áridas. Por último, la introducción de nuevas tecnologías en

los ámbitos de la energía y el agua podría cambiar las demandas de estos recursos [13].

La Agencia Internacional de Energía [14] proyecta para el año 2040, un aumento del uso consuntivo del agua en el mundo en casi un 60 %, afectando a hidroeléctricas de la misma zona cuya extracción de agua aumentará en menos del 2 %. Debido al crecimiento poblacional y los cambios en la dieta, el consumo de alimentos está aumentando en casi todas las regiones del mundo. Se espera que para el año 2050 sea necesario producir 200 millones de toneladas de carne y 1 billón adicional de toneladas de cereal al año para poder satisfacer la creciente demanda de alimentos. Por ello la agricultura es responsable del 90 % del uso consuntivo del agua [15].

Debido a estos problemas mundiales, el país se ve en la necesidad de abordar y planificar el aprovechamiento de sus recursos hídricos considerando su nexo. La Ley de Recursos Hídricos del Ecuador menciona en el artículo 30: “El Estado y sus instituciones en el ámbito de sus competencias son los responsables de la gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca hidrográfica. En consecuencia, son los obligados a regular los usos, el aprovechamiento del agua y las acciones para preservarla en cantidad y calidad mediante un manejo sustentable a partir de normas técnicas y parámetros de calidad” [16].

Por otra parte, en el Ecuador, la Constitución del 2008, en el Art. 313 determina: “El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos; se consideran sectores estratégicos la energía en todas sus formas...” [17]. Este artículo tiene como objetivo analizar el caso del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS), como ejemplo del nexo existente entre el agua y la energía; donde los usos consuntivos del agua disminuirían el caudal de entrada al túnel de conducción, arriesgando con esto su capacidad de generación eléctrica de este proyecto emblemático. A continuación, en la sección 1.1, se muestra la síntesis de la historia del PHCCS, en la sección 2 se analiza como metodología, los informes de factibilidad del PHCCS y los proyectos que hacen uso consuntivo del agua, en la sección 3 se analiza como dichos proyectos afectarían al caudal de ingreso del PHCCS y, finalmente, en la sección 4 se ofrece unas conclusiones evidenciando la necesidad de planificar el nexo agua-energía de manera integrada.

1.1. El Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair

El PHCCS es una obra que fue calificada como emblemática por el Gobierno ecuatoriano, se construyó en el origen del cauce del río Coca en la provincia de Napo [18], toma su nombre por el geólogo norteamericano Joseph Sinclair, quien al recorrer el río Coca en el Oriente ecuatoriano, identificó una curva marcada,

que luego fue bautizada por la población del sector como Codo Sinclair. Este investigador afirmó que este lugar tenía la posibilidad de ser utilizada para generar energía eléctrica [19].

El PHCCS, fue uno de los proyectos más importantes del Plan Nacional de Electrificación, en la cuenca de los ríos Quijos y Coca, durante los años setenta y ochenta, siendo el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), la empresa encargada de realizar los estudios. En 1976 se realizaron dos, el de prefactibilidad por la empresa brasileña Hidroservice y el de la capacidad total de aprovechamiento por empresas consultoras italianas Electroconsult y Rodio, la empresa belga Tractionel y las empresas nacionales Ingeconsult, Inelin, Astec y Caminos y Canales [20].

Entre abril de 1990 y junio de 1992 para la optimización de la alternativa seleccionada, se realizó el diseño de factibilidad en dos etapas continuas que generarían 432 (MW) y 427 (MW) de potencia respectivamente sumando un total de 859 (MW) de potencia. Este estudio incluía modificaciones del proyecto debido al terremoto que hubo cerca del volcán Reventador en el mes de marzo de 1987, el cual cambió notablemente la fisonomía del terreno. En el 2007 el Estado modificó dicho estudio y fue rediseñado hasta alcanzar una potencia de 1500 (MW) [18].

El PHCCS fue anunciado el 15 de enero del 2007 y fue considerado de alto interés nacional, siendo incluido en el Plan Maestro de Electrificación. En ese año, las empresas encargadas de su gestión fueron dos; el primer trimestre fue el Consejo Nacional de Electricidad (Conelec) y en julio fue el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER). Sin embargo, cabe anotar que como operadora del proyecto había sido designada, en septiembre del 2007, la empresa del estado ecuatoriano Termopichincha, que más adelante pasa a conformar con la empresa argentina ENARSA el consorcio Coca Sinclair S. A. [20].

En el 2008 los estudios fueron aprobados por el Conelec. La Compañía Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair S. A. de Quito, encargó a la Compañía Consultora ELC-Electroconsult de Milán, Italia los estudios de rediseño conceptual para alcanzar 1500 (MW). En el 2009 ELC-Electroconsult presenta el estudio de factibilidad final de 1500 (MW). La Compañía Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair S. A. de Quito contrata a la empresa SINOHYDRO para el desarrollo de ingeniería y es esta la que inicia su construcción [20]. Después de seis años, el 18 de noviembre de 2016 se inaugura el PHCCS [21].

Tras finalizar la construcción, las principales obras que conforman el PHCCS son la obra de captación que cuenta con una presa de 31,8 (m) de altura máxima, vertedero con una altura del azud de 13,5 (m) y ancho neto de 160 (m), desarenador de 8 cámaras. El túnel de conducción con una longitud de 24,8 (km), 9,10 (m) de diámetro de excavación y un diámetro interior

de 8,20 (m), diámetro de diseño de 222 (m³/s). El embalse compensador conformado por una presa de enrocado con cara de hormigón de 58 (m) de altura, para crear un embalse útil de 800 000 (m³). Las tuberías de presión son dos y conducen el agua desde el embalse compensador hasta la casa de máquinas, en hormigón y con revestimiento de acero en su tramo final, de 1400 (m) de longitud y tienen un diámetro interno de 5,8 y 5,2 (m) respectivamente, el caudal de diseño es de 139,25 (m³/s) cada una. La casa de máquinas es una caverna excavada en roca de 26 × 46,8 × 219,5 (m) donde se ubican 8 turbinas tipo Pelton de eje vertical con 6 inyectores cada una y una potencia unitaria de 187,5 (MW), que turbinan las aguas del río Coca, que se forma a partir de la unión de los ríos Quijos y Salado como se observa en la Figura 1 [22].



Figura 1. Ubicación del PHCCS (adaptado de [23]).

Utilizando la ecuación general (1) que rige la potencia instalada de una central hidroeléctrica, denominada también potencia útil nominal, se calcula el caudal necesario para generar la potencia de 1500 (MW), detallándose la misma a continuación [24].

$$P_i = \eta_t \times \eta_g \times \eta_{tr} \times \lambda \times Q \times H \quad (1)$$

donde:

P_i = Potencia útil nominal (W)

Q = Caudal que entra en la tubería de presión (m³/s)

H = Altura neta nominal (m)

η_t = Eficiencia de la turbina Pelton

η_g = Eficiencia del generador

η_{tr} = eficiencia del transformador

A continuación, se muestran los datos obtenidos del anexo f del informe de factibilidad del PHCCS realizado por ELC-Electroconsult [25].

$H = 604,1$ (m)

$P = 1500$ (MW)

$\eta_t = 91$ %

$\eta_g = 97,52$ %

$\eta_{tr} = 99,5$ %

Reemplazando los datos en la ecuación (1), se tiene:

$$P_i = \eta_t \times \eta_g \times \eta_{tr} \times 9,81 \times Q \times H \times 1000$$

$$Q = \frac{P_i}{\eta_t \times \eta_g \times \eta_{tr} \times 9,81 \times H \times 1000}$$

$$Q = \frac{1500000000}{0,91 \times 0,9752 \times 0,995 \times 9,81 \times 604,1 \times 1000}$$

$$Q = 286,6(m^3/s)$$

Dado que el PHCCS es una central de pasada con regulación diaria [25], para generar 1500 (MW), el caudal turbinado, es decir, el caudal que debe ingresar a las dos tuberías de presión es de 286,6 (m³/s), es decir, 143,3 (m³/s) en cada una. Según Synohidro Corporation, el PHCCS solo puede generar esta potencia 4 horas diarias, sin embargo, el caudal de diseño de las tuberías de presión es de 139,25 (m³/s), es decir, 278,5 (m³/s) las dos [25].

En el 2017, tras un año de operación, el PHCCS ha producido el 66,7 % de la energía esperada. Entre enero y diciembre, la central, aportó al sistema nacional interconectado un total de 5838 (GWh), una cifra por debajo de la generación media proyectada, que es de 8734 (GWh) [21].

2. Materiales y métodos

La investigación presentada es de tipo bibliográfica con un alcance descriptivo. Se analiza el estudio de factibilidad que presentó INECEL en el año 1992 donde

se observa el comportamiento histórico del caudal del río Coca, el estudio de factibilidad que presentó ELC-Electroconsult que muestra el rediseño del estudio de Incel. Además, se revisan los proyectos que afectarían el caudal que ingresa al PHCCS debido a los usos consuntivos de agua.

2.1. Estudios de factibilidad

A continuación, se va a analizar los dos informes de factibilidad del PHCCS, el primero corresponde al estudio que realizó INECEL aprobado en el año de 1992 y el segundo corresponde al estudio que realizó ELC-Electroconsult aprobado en el año 2009.

2.1.1. Estudio de factibilidad de 1992 del PHCCS

El estudio de factibilidad fue realizado por INECEL. Para calcular los caudales del proyecto, se partió de datos históricos del río Coca y la cascada San Rafael, el lapso comprendido fue desde 1972 a 1987 para la cascada San Rafael y desde 1972 a 1987 para el río Coca en el sector El Salado [18]. Dado que este estudio se hizo en una misma estación fluvial y durante un lapso de quince a veinte periodos que abarcan años secos, normales y húmedos, esta metodología es ampliamente aceptada [26]. En la Figura 2, se observa los caudales medios mensuales registrados en la estación del río Coca en el sector El Salado durante los lapsos de tiempo antes señalados. La curva de duración general de caudales diarios en el sitio El Salado elaborada por INECEL se ilustra en la Figura 3 [19].

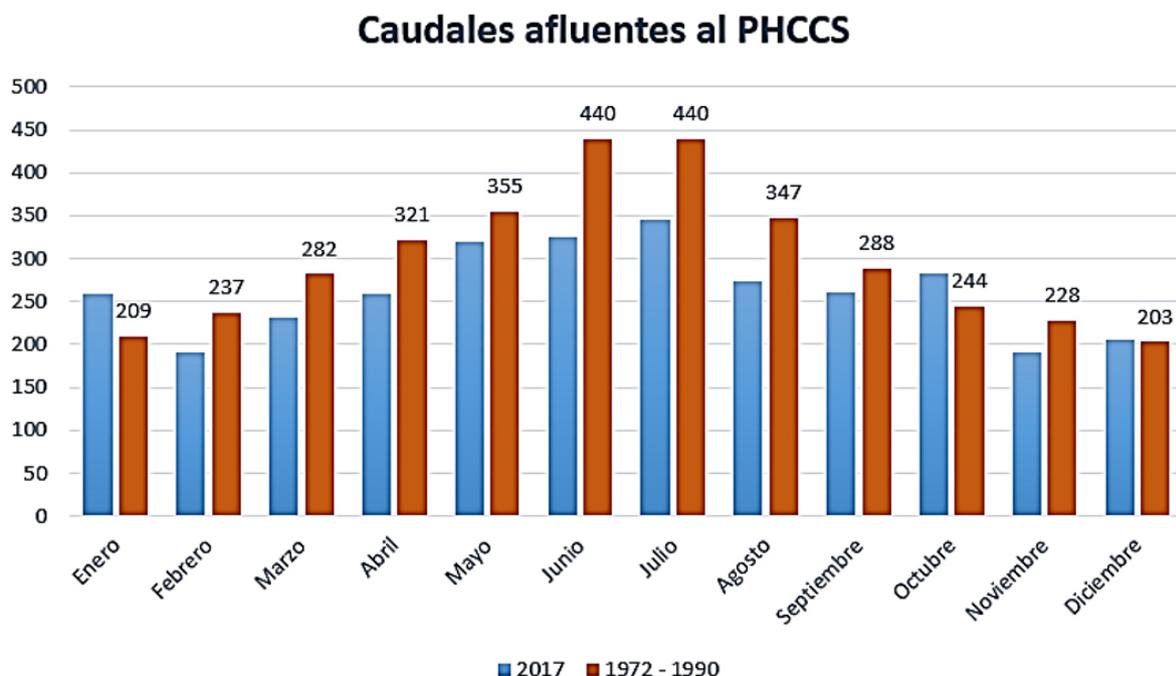


Figura 2. Comparación entre los caudales del 1972-1990 y del 2017.

De esta manera, Inecel determina que el caudal promedio del río Coca en el sector El Salado es de 292 (m^3/s) descontando 3 (m^3/s) que eran tomados por el acueducto Papallacta-Quito, lo que corresponde a una contribución específica superior a los 80 ($\text{l}/\text{s}/\text{km}^2$). El caudal firme diario garantizado en un 90 % del tiempo es de 127 (m^3/s) [18].

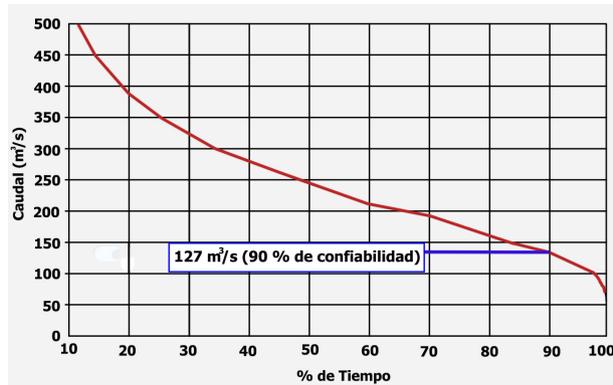


Figura 3. Curva de duración general de caudales diarios en el sitio El Salado (adaptado de [19]).

La empresa Inecel decidió que el caudal se debía captar en 2 etapas, la primera debía ser de 63,5 (m^3/s), al cual se tenían que añadir otros 63,5 (m^3/s) en segunda alcanzando así en total 127 (m^3/s). Tanto en primera etapa como en la segunda el factor de planta se había mantenido igual a 0,8 [22].

2.1.2. Estudio de factibilidad actual del PHCCS

El estudio de factibilidad actual del PHCCS fue realizado por ELC-Electroconsult, y se basó en el estudio hidrológico que realizó Inecel en el año 1992 donde se registra el caudal histórico del río Coca [22].

ELC-Electroconsult señaló que para alcanzar los 1500 MW instalados en la casa de máquinas, manteniendo las mismas pérdidas del estudio de factibilidad en las obras de caída, se requeriría un caudal máximo de 278,5 (m^3/s) en la tubería de presión, lo que corresponde a un caudal entrante en el embalse compensador de 222,7 (m^3/s). Restando 0,7 (m^3/s) del caudal promedio de la quebrada Granadilla, se obtiene el valor de 222,0 (m^3/s). Por lo tanto, el caudal a ser derivado en el sitio El Salado a la presa y que transitaría en el túnel de conducción es de 222,0 (m^3/s) [22].

Para obtener un caudal máximo de 278,5 (m^3/s) en la tubería de presión manteniendo el factor de planta (0,8), se requirió aumentar el volumen útil del embalse compensador de 460 000 (m^3) a 800 000 (m^3) manteniendo siempre los mismos valores de niveles mínimo y máximo, es decir, 1229,50 y 1216,00 (m s. n. m.) respectivamente [22].

Por otro lado, CENACE dispone información sobre el caudal afluente al embalse compensador del PHCCS

que se muestran en la Tabla 1. En la Figura ?? se puede evidenciar una disminución de los caudales del año 2017 con los históricos de los obtenidos de 1972-1990.

Cabe considerar el cambio significativo en la fisionomía del sector, debido principalmente a la construcción de la vía Valle de Quijos-Lago Agrio, la cual fue entregada en 1972 y fomentó la colonización del sector con la consecuente transformación de la masa boscosa en pastizales y la explotación maderera, lo cual seguramente afectó las condiciones climáticas de esta cuenca hidrológica y el caudal de sus ríos [27]. Estos últimos se ven afectados también por los usos consuntivos del agua.

Tabla 1. Caudal afluente al embalse compensador del PHCCS [21]

Meses	Caudal (m^3/s)	
	2016	2017
Enero	-	258,75
Febrero	-	190,21
Marzo	-	230,37
Abril	-	258,11
Mayo	697,9	320,35
Junio	707,38	324,84
Julio	560,6	344,57
Agosto	506,23	272,94
Septiembre	394,34	259,8
Octubre	298,5	283,55
Noviembre	148,03	190,05
Diciembre	135,89	205,16

2.2. Usos consuntivos del agua

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, define al uso consuntivo como aquel en el que el líquido vital, una vez utilizado, no se devuelve al medio donde se ha captado, ni de la misma manera que se ha extraído [16]. Estos tipos de usos se pueden identificar en cuatro proyectos; uno ya existente, dos en construcción y uno programado como muestra la Figura 4, que van a captar o captan el agua que conforman el caudal que ingresa al PHCCS, estos son los siguientes:

Existente:

- Proyecto Papallacta de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento del Distrito Metropolitano de Quito (EPMAPS).

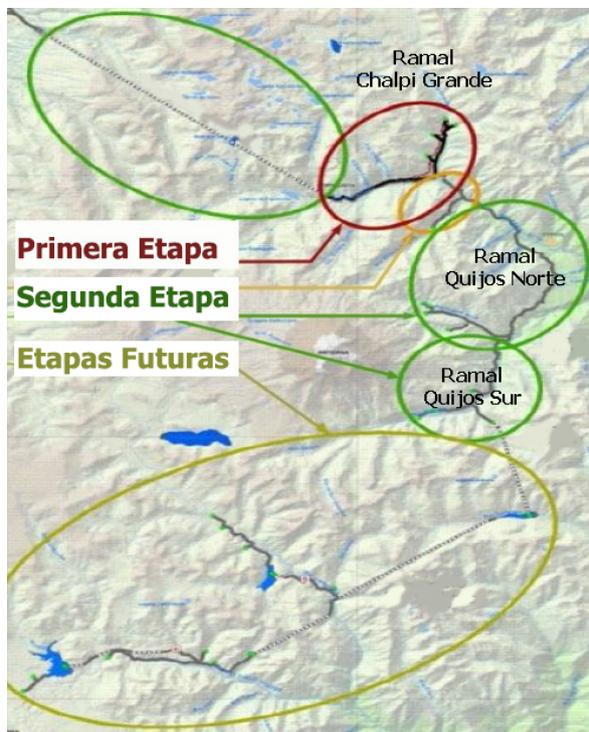


Figura 5. Etapas del Proyecto Ríos Orientales (adaptado de [33])

La primera etapa: Ramal Chalpi Grande-Papallacta comprende un canal que captará el caudal de 2,21 (m³/s) de los afluentes: Chalpi A (1,23 m³/s), Encantado (0,64 m³/s), Chalpi B (0,27 m³/s) y Chalpi C (0,07 m³/s) que conforman el río Chalpi Grande como se muestra en la Figura 6, y lo transvasa al reservorio en Papallacta [33].

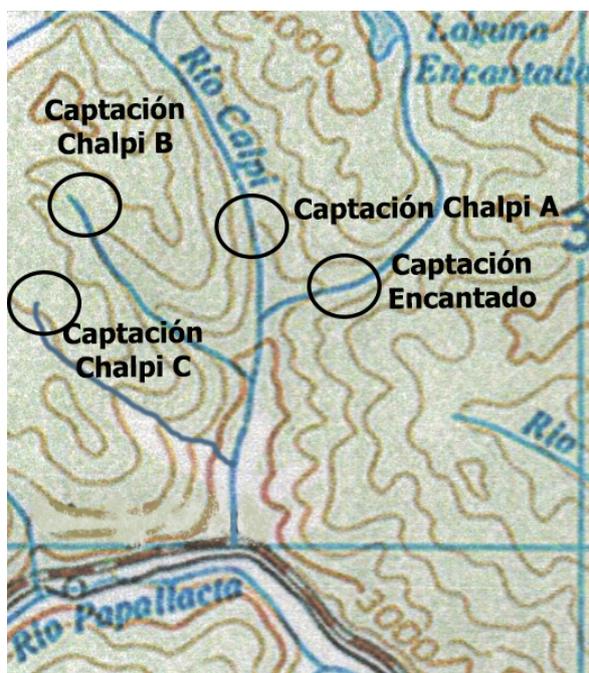


Figura 6. Etapa 1 del PRO (adaptado de [34]).

En julio del 2018, el gerente de la EPMAPS señaló que el proyecto registra un avance del 26 % y su culminación será en el 2021 [35].

La segunda etapa: Ramal Quijos-Papallacta-Paluguiño empezará en el año 2040 y tiene previsto captar un caudal total de 4,691 (m³/s) de los ríos Quijos Norte, Tablón, Cristal, Pucalpa, Azufrado, Semiond, Quijos Sur y Blanco Grande [36].

Las etapas futuras empezarán en el año 2041 y tiene previsto obtener un caudal de los ríos Cosanga, Antisana, Valle Viscoso y sus afluentes [32].

2.2.3. Proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo y agua potable Pesillo-Imbabura

El Proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo y agua potable Pesillo-Imbabura tiene por objetivo captar las aguas de los ríos Arturo, Boquerón, San Pedro, San Jerónimo y Montoneras a través de túneles de aducción que conectan al río Arturo con el Boquerón, al río Boquerón con el San Pedro y al San Pedro con La Rápida, como muestra la Figura 7 [37]. En el primer proceso, el 220-96, la Resolución de la Agencia de Aguas de Quito, dictada el 15 de abril de 1999, favoreció al Gobierno Provincial de Pichincha, concediéndole el derecho de uso y aprovechamiento de las aguas de los ríos Azuela, Arturo, Boquerón y San Pedro, con un caudal total de 3,325 (m³/s) [38].



Figura 7. Ubicación del Proyecto Cayambe-Pedro Moncayo y Pesillo-Imbabura (adaptado de [33]).

En el segundo proceso, el 1375-00, la Agencia de Aguas de Quito concede al Gobierno Provincial de Pichincha el derecho de aprovechamiento de las aguas que provienen de los ríos San Jerónimo, Montoneras, La Chimba, y sus afluentes. De estos ríos, los que afectan al caudal del río Salado que alimenta al PHCCS, son los dos primeros, con un caudal de 0,24 (m³/s) y 0,08 (m³/s) respectivamente. Asimismo, la Agencia de Aguas de Quito concede a favor del Gobierno Provincial de Imbabura, las aguas que provienen de los ríos Montoneras con un caudal de 0,1 (m³/s) y San Jerónimo con un caudal de 0,31 (m³/s) [39]. Dichos caudales,

sumados al de la anterior concesión, que también desembocan en El Salado, de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro, totaliza 4,06 (m³/s) [39].

El 13 de diciembre del 2017 el director del proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo y agua potable Pesillo-Imbabura, informó que el proyecto registra un avance del 95,60 % [37].

3. Resultados y discusión

A continuación, en la Figura 8 se recopila los eventos pasados y futuros que afectarían al caudal del PHCCS.

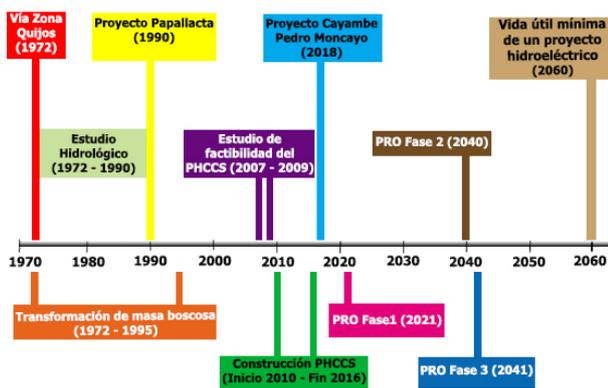


Figura 8. Línea del tiempo con proyectos que afectan al caudal del PHCCS.

Del análisis realizado de los tres proyectos, se desprende que del caudal del río Coca en el sector El Salado, se debería restar 20 (m³/s) debido al caudal ecológico (ELC-Electroconsult, 2009); y en un futuro cercano el caudal de 4,06 (m³/s) del proyecto Cayambe-Pedro Moncayo y Pesillo-Imbabura para el año 2018; un caudal de 2,21 (m³/s) del proyecto Chalpi Grande, que corresponde a la etapa uno del PRO. Sin embargo, la concesión de 1987, le permite utilizar hasta 5 (m³/s), considerando que 3 (m³/s) ya han sido utilizados en el proyecto Papallacta; y por último se debe considerar un total de 17,2 (m³/s) del PRO correspondiente a la segunda y tercera etapa, que iniciarían en el año 2040 y 2041 respectivamente. En la Tabla 3 se explica más detalladamente los proyectos que restarían el caudal del PHCCS. Hay que considerar que la vida útil de un proyecto hidroeléctrico es generalmente de 50 a 75 años [39].

Como se observa en la Tabla 3, el caudal que ingresa al PHCCS disminuiría un valor máximo de 26,29 (m³/s), equivalente al 11 % del caudal de diseño. Dado que el PHCCS es una central de pasada con regulación diaria, dicha disminución de caudal afectaría a la generación eléctrica en un porcentaje similar.

Tabla 3. Proyectos que influyen en el caudal del PHCCS

Denominación	Año	Caudal (m ³ /s)
Caudal ecológico	2016	20
Proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo y agua potable Pesillo-Imbabura	2018	4,06
Proyecto Papallacta y PRO (etapa 1)	2021	≈ (2,21-5,00)
PRO (etapa 2 y etapa 3)	2040-2055	17,23
Total		≈ (23,5-26,29)

4. Conclusiones

El Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, vería afectada su capacidad de generación de energía por a la reducción del caudal de 222 (m³/s) de entrada debido los futuros usos consuntivos del agua por parte de la EPMAPS, debido al Proyecto Chalpi Grande, que tomaría 2,2 (m³/s) y las siguientes fases del Proyecto Ríos Orientales que tomaría hasta 17,2 (m³/s). A esto se restaría también el caudal utilizado por el Proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo y el de agua potable Pesillo-Imbabura, que se tienen previsto culmine en este año 2018, que en total tiene otorgada una concesión de 4,06 (m³/s). El caudal que ingresa al PHCCS se vería en el futuro reducido hasta en un 11 %, afectando su generación eléctrica. Queda en evidencia la necesidad de planificar el aprovechamiento de los recursos considerando su nexa.

Referencias

- [1] H. Hoff, "Understanding the nexus. background paper for the bonn2011 conference: The water, energy and food security nexus," in *Stockholm Environment Institute, Stockholm*, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/aiCG9J>
- [2] GWSP, "Sustainability in the water-energy-food nexus," in *International Conference. Global Water System Project*, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/CQjWTX>
- [3] OECD, *Sustainable Management of Water Resources in Agriculture*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264083578-en>
- [4] McKinsey&Company, "Charting our water future. economic frameworks to inform decision-making," 2030 Water Resources Group, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/XEWfc3>

- [5] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), “The united nations world water development report 2014: Water and energy,” Paris, UNESCO., Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/LFGg6d>
- [6] T. R. Albrecht, A. Crotoft, and C. A. Scott, “The water-energy-food nexus: A systematic review of methods for nexus assessment,” *Environmental Research Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 1–26, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>
- [7] C. Middleton, J. Allouche, D. Gyawali, and S. Allen, “The rise and implications of the water-energy-food nexus in southeast asia through an environmental justice lens,” *Water Alternatives*, vol. 8, no. 1, pp. 627–654, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/JKikGy>
- [8] H. Leck, D. Conway, M. Bradshaw, and J. Rees, “Tracing the water–energy–food nexus: Description, theory and practice,” *Geography Compass*, vol. 9, no. 8, pp. 445–460, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/gec3.12222>
- [9] IEA, *Water energy nexus*. International Energy Agency. Secure Sustainable Together, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/DGsKrf>
- [10] D. Lofman, M. Petersen, and A. Bower, “Water, energy and environment nexus: The california experience,” *International Journal of Water Resources Development*, vol. 18, no. 1, pp. 73–85, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/07900620220121666>
- [11] J. Pittock, D. Dumaresq, and A. M. Bassi, “Modeling the hydropower–food nexus in large river basins: A mekong case study,” *Water*, vol. 8, no. 10, p. 425, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w8100425>
- [12] F. Ackerman and J. Fisher, “Is there a water–energy nexus in electricity generation? long-term scenarios for the western united states,” *Energy Policy*, vol. 59, pp. 235–241, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.027>
- [13] W. N. Lubega and A. M. Farid, “An engineering systems model for the quantitative analysis of the energy-water nexus,” in *Complex Systems Design & Management*, M. Aiguier, F. Boulanger, D. Krob, and C. Marchal, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 219–231. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-02812-5_16
- [14] U.S. Department of Energy, “The water-energy nexus: Challenges and opportunities,” Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/Q8ABT5>
- [15] Asamblea Constituyente, *Capítulo quinto. Sectores estratégicos, servicios y empresas públicas. Art. 313*. República del Ecuador, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/hFdWQm>
- [16] ENTRIX, *Estudio de impacto ambiental preliminar del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair*. ENTRIX. Consultora Ambiental, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/zvSdEZ>
- [17] Asamblea Nacional, *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. República del Ecuador. Secretaría del Agua, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/idEuHH>
- [18] Y. Granda Paladines, *Estudio experimental en modelo hidráulico físico sobre la optimización de la bocatoma del Proyecto Coca-Codo-Sinclair*. Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional, 1992. [Online]. Available: <https://goo.gl/q1RPsG>
- [19] V. López, “Implicaciones del proyecto Coca Codo Sinclair para la amazonía ecuatoriana,” FLACSO, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/mP2PEX>
- [20] CENACE, *Informe anual 2017*. Operador Nacional de Electricidad. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/Hc9wsB>
- [21] CELEC, *Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair rediseño Conceptual para 1500 MW*,. Corporación Eléctrica del Ecuador. Coca Codo Sinclair, 2009.
- [22] G. Rodriguez. (2014) El proyecto coca codo sinclair: un lazo internacional hacia el desarrollo del ecuador. Blog Ecuador hacia el desarrollo. [Online]. Available: <https://goo.gl/sC2mkt>
- [23] a. Robles and I. Fernández, *Centrales de Generación de Energía Eléctrica*. Universidad de Cantabria, 2012.
- [24] Sinohydro Corporation, *Contrato para el desarrollo de ingeniería para el Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair*, 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/JcQWea>
- [25] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones del Castillo S. A., 1986. [Online]. Available: <https://goo.gl/4FZiEH>
- [26] J. E. Grijalva, *Expansión y trayectorias de la ganadería en la Amazonía: estudio en el Valle de Quijos y Piedemonte, en Selva Alta. Ecuador*, 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/gf9vZL>

- [27] INAMHI, *Mapa de ubicación de la red hidrológica en operación por cuencas hidrográficas del Ecuador*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Ecuador., 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/onJ7Qw>
- [28] GAD Papallacta, *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial gobierno autónomo descentralizado parroquial de Papallacta*, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/EvKSKM>
- [29] Secretaría del Agua, *Resolución 2013-16-EPMAPS-Q.*, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/EhTFGG>
- [30] Ministerio del Ambiente, *Plan de Manejo Adaptativo de la parte alta de la Reserva Ecológica Antisana*. Ecuador, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/h1EXh1>
- [31] EPMAPS, *Primera etapa del proyecto de agua potable ríos orientales ramal Chalpi Grande – Papallacta. 2017*. Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Alcaldía de Quito. Ecuador, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/D1RMZs>
- [32] —, *Estudios de factibilidad y diseños definitivos del proyecto de agua potable ramal Chalpi grande – Papallacta y central hidroeléctrica Chalpi grande*. Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Alcaldía de Quito. Ecuador, 2014.
- [33] Alcaldía de Quito, *Quito tendrá abastecimiento de agua hasta el 2040 con el “Ramal Chalpi Grande – Papallacta”*, 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/Be3Fg1>
- [34] L. Pachacama Oña and M. F. Cevallos López, *Análisis de riesgo, vulnerabilidad de los estudios de la segunda etapa del proyecto de agua potable Ríos Orientales Ramal Quijos-Papallacta-Paluguillo*. Tesis de Grado. Escuela Politécnica del Ejército, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/rjrmWD>
- [35] IGM, *Cartografía de Quito 1:25000*. Instituto Geográfico Militar. Ecuador, 1990.
- [36] Gestión de Comunicación. (2017) Sistema de riego cayambe-pedro moncayo. Prefectura de Pichincha. Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/ReqZjP>
- [37] SENAGUA, *Resolución de la Agencia de Aguas de Quito, proceso 220-96*. Quito. Ecuador., 1999.
- [38] SE, *Resolución de la Agencia de Aguas de Quito, proceso 1375*. Quito. Ecuador., 2005.
- [39] T. Ochoa Rubio, *Centrales hidroeléctricas tomo 1*. Ediciones Granacolombianas. Universidad la Gran Colombia., 2002.



ESTIMACIÓN EMPÍRICA DEL PRETENSADO DE UNA BANDA TRAPEZOIDAL MEDIANTE EL DESLIZAMIENTO DE LAS POLEAS

EMPIRICAL ESTIMATION OF THE PRESTRESSED OF A V-BELT THROUGH THE SLIP OF THE PULLEYS

Eduardo Hernández-Dávila^{1,*}, Luis Cacuango-Eugenio², Verónica López-Pérez²,
Julio Cajamarca-Villa¹

Resumen

La inspección de la pretensión de las bandas es una actividad de mantenimiento preventivo imprescindible; que, para poder ser realizada, requiere que la máquina esté apagada, generando un impacto económico en menor o mayor grado dependiendo del contexto operacional de cada máquina. El objetivo de esta investigación experimental es determinar un modelo matemático para el cálculo del pretensado de las bandas trapezoidales de perfil clásico y de alto rendimiento en función del deslizamiento; para lo cual se construyó un módulo de prueba, en el que se estableció la diferencia de las frecuencias de rotación entre la teórica y la real de la polea conducida, a medida que se incrementó el pretensado de la banda. Los datos arrojados se ajustaron a una función exponencial inversa, dando como resultado dos ecuaciones, una para las correas trapezoidales de perfil clásico y otra para las de alto rendimiento. La validación de estas ecuaciones se realizó mediante el coeficiente de correlación r de Pearson. Con la utilización del modelo matemático propuesto, se podrá minimizar el impacto económico de las actividades preventivas de revisión del pretensado de las bandas; puesto que, estas ecuaciones posibilitan la realización de esta actividad con la máquina encendida y a plena carga, requiriendo para ello únicamente la medición de las frecuencias de rotación de las poleas.

Palabras clave: banda trapezoidal, deslizamiento, polea, pretensión de bandas.

Abstract

Inspecting the pre-tension of belts is an essential preventive maintenance activity, which requires that the machine is powered off to be carried out. This generates an economic impact of lesser or greater degree depending on the operational context of each machine. The objective of this experimental investigation is to determine a mathematical model, for calculating the pre-tension of v-belts of classic profile and high performance as a function of the slip. To achieve this objective, a test module was built to establish the difference between the theoretical and real rotation frequencies of the driven pulley, as the pre-tension of the belt was increased. Then, an inverse exponential function was adjusted to the data obtained, resulting in two equations for v-belts of classic profile and of high throughput, respectively; these equations were validated using Pearson's r correlation coefficient. The proposed mathematical model can be used to minimize the economic impact of checking the pre-tension of the belts, since it allows carrying out this activity with the machine operating on full load, requiring only the measurement of the rotation frequencies of the pulleys.

Keywords: v-belt, slip, pulley, prestressed of the belt.

^{1,*}Grupo de Investigación Ciencia del Mantenimiento (CIMANT), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: edhernandez@esepoch.edu.ec

<http://orcid.org/0000-0003-4899-2371>, <http://orcid.org/0000-0002-6568-6037>.

²Facultad de Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

<http://orcid.org/0000-0003-2075-3694>, <http://orcid.org/0000-0002-3488-7039>.

Recibido: 21-11-2018, aprobado tras revisión: 17-12-2018

Forma sugerida de citación: Hernández-Dávila, E.; Cacuango-Eugenio, L.; López-Pérez, V. y Cajamarca-Villa, J. (2019). «Estimación empírica del pretensado de una banda trapezoidal mediante el deslizamiento de las poleas». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.06>.

1. Introducción

En la actualidad, las bandas trapezoidales son muy utilizadas para transmitir potencia en máquinas industriales y aplicaciones vehiculares, donde no se requiera una velocidad precisa y donde se demande niveles de potencia moderados. Su costo es más bajo en comparación con las transmisiones por engranes y cadena y su funcionamiento relativamente silencioso [1, 2]. Tienen la característica de absorber las cargas de choque y disminuir los efectos de la vibración [3].

En los textos de diseño de elementos de máquina, la selección de bandas trapezoidales se basa en que la potencia que se desea transmitir, debe ser menor a la potencia que la banda o conjunto de ellas, son capaces de soportar, en este proceso también se determina la tensión inicial o pretensado que garantice la transmisión de potencia sin deslizamiento [4–6].

Sin embargo, dependiendo de las condiciones de trabajo, en estos sistemas de transmisión de potencia siempre existe deslizamiento entre la banda y la polea, por lo que la relación de transmisión no es constante [7, 8]. El mecanismo de deslizamiento de bandas planas y trapezoidales, ha sido estudiado ampliamente de forma analítica y experimental. Reynolds [9] demostró que la pérdida de velocidad se presenta debido al deslizamiento elástico de la banda.

Gerbert [10–12] desarrolló dos teorías relacionadas principalmente con la resistencia a la flexión y la deflexión por cizallamiento (teoría de fluencia clásica); no obstante, el deslizamiento es mucho más alto que el predicho por esta teoría. Posteriormente desarrolló una nueva teoría unificada que se ajustó mejor a las observaciones experimentales, pero que falla a baja tensión.

Belofsky [13] propuso un modelo que contempla la elasticidad de la correa, la resistencia a la flexión y la variación de la fuerza de fricción a lo largo del arco de contacto, basado en un régimen de deslizamiento lineal. En su trabajo describe un método experimental para determinar μ en cualquier punto del arco de contacto de la correa.

Childs y Cowburn [14] analizaron la resistencia a la flexión de la correa, el ajuste radial, la distorsión debido al diámetro de la polea y la pretensión de la correa, para describir la pérdida de velocidad y de torsión de las transmisiones por correa trapezoidal. Chen y Shieh [15] obtuvieron la pérdida de velocidad en un sistema de transmisión de correa plana desarrollando un modelo de elementos finitos 3D.

Balta, Sonmez y Cengiz [16] determinaron que el deslizamiento en el sistema de transmisión por correa acanalada revela que cuanto más pequeño es el tamaño de la polea, más grande es el deslizamiento de la correa y que por debajo de un cierto nivel de pretensión de la correa, los valores de deslizamiento aumentan.

En la bibliografía consultada se puede observar

que la mayoría de estudios en sistemas de transmisión flexibles, se centran en la pérdida de potencia, y para ello analizan entre otros, los factores que intervienen en el deslizamiento y los efectos del pretensado de la banda.

Los valores de las variables de las formulaciones propuestas se pueden obtener experimentalmente; sin embargo, según sus autores, estas deben ser determinadas para cada combinación de velocidad, diámetros, distancia entre centros y material de las poleas [17, 18], creando múltiples posibilidades en los que difícilmente se podrá cubrir los casos particulares de sistemas de transmisión que ya se han construido y forma parte de un ambiente industrial, donde no se pueden hacer ensayos experimentales.

Una vez que las bandas montadas en los sistemas de transmisión, entran en operación, sufren un alargamiento considerable en un lapso de tiempo pequeño, ocasionando la disminución del tensado inicial por lo que los fabricantes de bandas recomiendan realizar un pretensado luego de un tiempo no mayor a 24 horas.

En los días posteriores, este alargamiento se manifestará luego de un lapso de tiempo no definido mucho mayor [19]; por lo que se requiere planificar una tarea preventiva a intervalos de tiempo fijo de tres a seis meses para verificar y corregir de ser necesario el pretensado [20].

Para medir el pretensado de la banda existen métodos con contacto y sin contacto que requieren que la máquina se encuentre apagada, este requerimiento no presume ningún problema cuando la máquina tiene un régimen de operación de 5 días a la semana ya que esta actividad como todas las preventivas son reservadas para realizarlas en los días de descanso, donde no se interrumpe la producción, pero si deben asumirse las horas extras.

En el caso de las máquinas que tienen un régimen de operación de 7 días a la semana, las 24 horas del día, las actividades de mantenimiento preventivo producirán indisponibilidad operacional al sistema y, por lo tanto, un costo asociado a la no producción [21], por lo que el tiempo de intervención debe ser el mínimo posible.

El objetivo del presente trabajo es determinar un modelo matemático basado en la experimentación para que a partir de la medición directa por medio de tacómetros láser de las velocidades de las poleas conducida y conductora (deslizamiento) se pueda estimar el pretensado de la banda sin la necesidad de apagar el equipo, ni de requerir de parámetros de difícil obtención, facilitando la aplicación para los técnicos de mantenimiento.

El principal aporte consiste en minimizar el impacto económico de la inspección del pretensado de las bandas; ya que, con la ayuda del modelo matemático propuesto, esta actividad puede realizarse sin interrup-

ciones durante la jornada normal de operación de la máquina.

Para el desarrollo de este estudio se utiliza un módulo de pruebas, donde se puede cambiar progresivamente la pretensión de la banda y observar la variación del deslizamiento producido, para posteriormente obtener la función que se ajuste matemáticamente a la relación existente entre el deslizamiento y el pretensado.

2. Materiales y métodos

2.1. Configuración experimental

Para investigar los efectos de la tensión de la banda sobre la pérdida de velocidad de la polea conducida en sistemas de transmisión flexible con bandas trapezoidales de perfil clásico y de alto rendimiento, se construyó la configuración mostrada en la Figura 1 y esquematizada en la Figura 2, cuyos elementos se encuentran apoyados firmemente sobre una base de acero AISI 1020 de 10 mm de espesor.

En este sistema, la polea conductora de 125 mm de diámetro, gira gracias a la energía mecánica suministrada por un motor eléctrico asíncrono jaula de ardilla de 373 W y de cuatro polos magnéticos, por lo que la frecuencia de rotación de su campo magnético es de 30 Hz.



Figura 1. Configuración del módulo de pruebas.

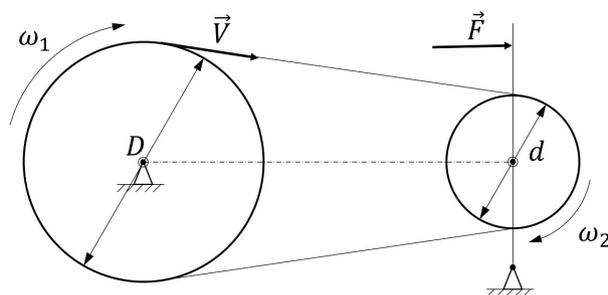


Figura 2. Esquema del sistema de transmisión por bandas.

La polea conducida de 70 mm de diámetro, gira solidaria a un alternador de 12 voltios y 35 amperios

a una frecuencia de rotación de 50 Hz, en el que se ha conectado una carga resistiva óhmica, de tal manera que el alternador proporciona al motor eléctrico una potencia igual al 80 % de su carga nominal.

Para esto se consideró que el rendimiento del motor (n) es del 78,2 %; por lo tanto, la resistencia óhmica conectada en el alternador se fijó en el punto en que la potencia eléctrica suministrada en el motor (P) fue de:

$$P = \frac{373W \times 0,80}{0,782} \approx 382W \quad (1)$$

Para generar la tensión en la banda, el alternador se fija a la placa base mediante un pasador permitiéndole girar sobre su eje, mientras que en la parte superior se dispuso de un templador en el que se insertó una balanza digital que funciona con una celda de carga, misma que mide la tensión de la banda a medida que se aprieta el templador.

Este templador se mantiene a una altura constante y se fija a la placa base mediante dos barras de tensión paralelas de 5 mm de espesor, mismas que como se puede observar en la Figura 3 alcanzan una deformación estática máxima de 0,9418 mm al someterles a 500 N que es la fuerza máxima que se puede medir con la balanza. Esta deformación no representa un valor considerable como para influir en las mediciones durante los ensayos, garantizando de esta manera su correcto funcionamiento.

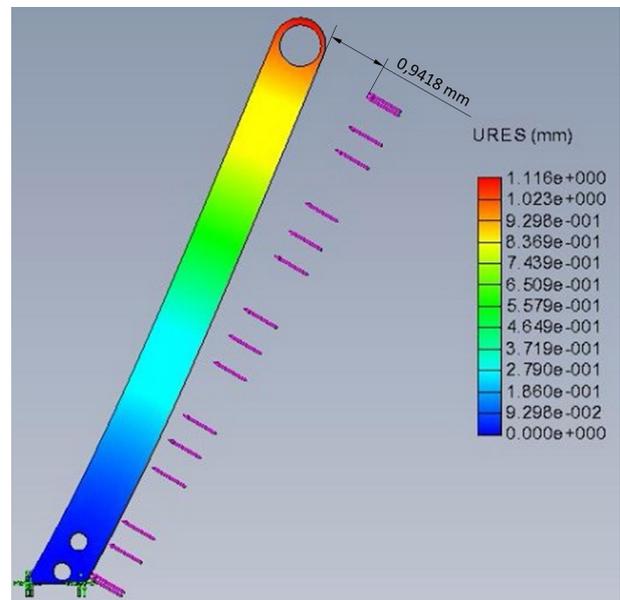


Figura 3. Deformación máxima de las barras de tensión paralelas obtenida mediante el método de elementos finitos en el software Solidworks, versión 2016.

Para la medición de las frecuencias de rotación de las poleas se ha empleado dos fototacómetros que apuntan directamente a una sección de cinta reflectiva

de 10 por 20 mm adheridas en la cara externa de cada polea en un punto alejado del centro.

Las bandas que se ensayaron fueron las trapezoidales de perfil clásico A-23 y las de alto rendimiento SPA-23 de la compañía Dongil, mismas que tienen una longitud de 584,2 mm.

2.2. Cálculo del deslizamiento

El deslizamiento es la razón entre la diferencia de velocidades de rotación teórica y real de la polea conducida y su velocidad teórica. Matemáticamente se expresa con la siguiente ecuación:

$$Dz = \frac{\omega_{t2} - \omega_2}{\omega_{t2}} \quad (2)$$

Donde Dz es el deslizamiento producido en el sistema de transmisión por bandas, ω_{t2} es la velocidad angular teórica de la polea conducida calculada con las ecuaciones del movimiento circular uniforme y ω_2 es la velocidad angular real de la polea conducida medida directamente.

Dado que la velocidad angular puede expresarse en términos de la frecuencia:

$$\omega = 2 \times \pi \times f \quad (3)$$

Y que, de acuerdo con el movimiento circular uniforme, la velocidad angular teórica de la polea conducida es función de la velocidad angular real de la polea conductora:

$$\omega_{t2} = \omega_1 \times \frac{D}{d} \quad (4)$$

La ecuación (2) se puede expresar de la siguiente manera:

$$Dz = 1 - \frac{f_2 \times d}{f_1 \times D} \quad (5)$$

Donde f_1 es la frecuencia de rotación real de la polea conductora en hercios (Hz) o revoluciones por minuto (rpm), f_2 es la frecuencia de rotación real de la polea conducida en hercios (Hz) o revoluciones por minuto (rpm), D es el diámetro de paso de la polea conductora en metros (m) y d es el diámetro de paso de la polea conducida en metros (m).

2.3. Cálculo de la tensión de la banda

Para poder calcular la tensión de la banda a través de las mediciones de la balanza incorporada en el tensor, se realiza un análisis estático del sistema de tensado del módulo, cuya conformación y diagrama de equilibrio se encuentran en las Figuras 4 y 5 respectivamente.

Como la fuerza medida por la balanza actúa sobre el punto H (Figura 4) y el alternador hace centro en G, se hace sumatoria de momentos en ese punto. Obteniendo la siguiente expresión:

$$\overline{GA} \times \vec{T}_2 \times \text{sen}(\beta - \varphi) + \overline{GB} \times W \times \text{cos}(\beta) + \overline{GC} \times \vec{T}_1 \times \text{sen}(\beta + \varphi) - \overline{GH} \times \vec{F} \times \text{sen}(\beta) = 0 \quad (6)$$

Debido a que en estado de reposo (máquina apagada sin movimiento rotacional) las tensiones de la banda T_1 y T_2 son iguales, y reemplazando los valores de las distancias (Tabla 1), se obtiene:

$$T = \frac{3 \times (2F \times \text{sen}(\beta) - W \times \text{cos}(\beta))}{2 \times (2 \times \text{sen}(\beta + \varphi) + \text{sen}(\beta - \varphi))} \quad (7)$$

Bajo esta condición de reposo, la tensión (T) calculada con la ecuación (7) es conocida como pretensado. En este punto debe aclararse que una vez que las poleas empiezan a girar, las tensiones 1 y 2 son diferentes [3]; factor que no se ha considerado, debido a que dentro de las operaciones de mantenimiento, lo importante es el pretensado que garantice las condiciones óptimas de funcionamiento de la banda y que se efectúa necesariamente con la máquina apagada (sin movimiento).

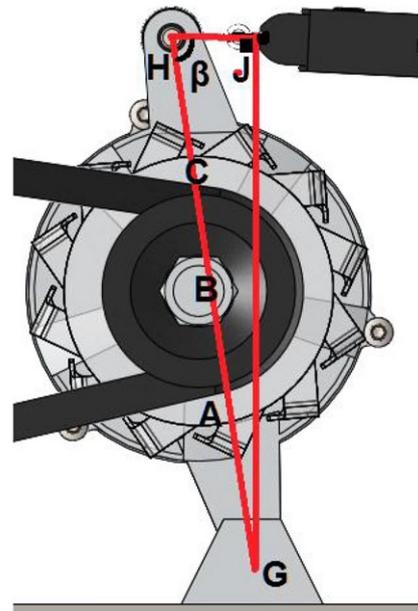


Figura 4. Sistema de tensado de la banda del módulo.

Tabla 1. Distancias de la Figura 4 del sistema de tensado en mm

\overline{GA}	\overline{GB}	\overline{GC}	\overline{GH}
60	90	120	180

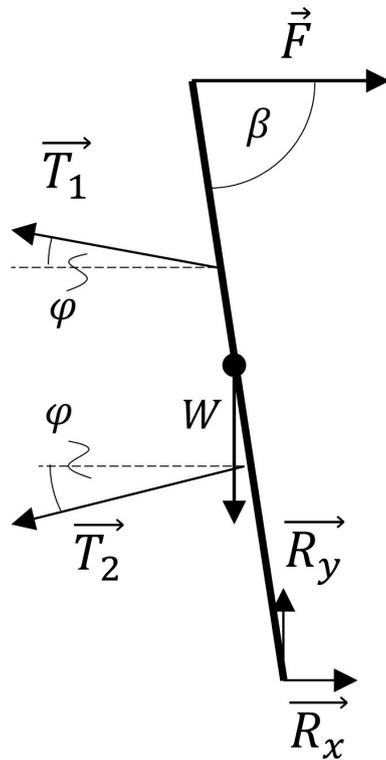


Figura 5. Diagrama de equilibrio del sistema de tensado de la banda del módulo.

3. Resultados y discusión

Mediante el promedio de cinco mediciones de las frecuencias de rotación de las poleas y de la fuerza aplicada por el sistema de tensado a intervalos crecientes de 50 N, se llegó a los resultados indicado en las Tablas 2 y 3 para las bandas trapezoidales de perfil clásico y de alto rendimiento, respectivamente, donde la tensión (T) y el deslizamiento (Dz) se calcularon con las ecuaciones (5) y (7) respectivamente.

Tabla 2. Deslizamiento y tensión de la banda trapezoidales de perfil clásico

F (N)	T (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Dz
49,05	39,7	29,17	50,43	3,17
98,1	88,22	29,08	50,45	2,86
147,15	136,51	29	50,47	2,55
196,2	185,14	28,92	50,48	2,23
245,25	233,47	28,83	50,5	1,92
294,3	281,79	28,77	50,48	1,72
343,35	330,12	28,63	50,27	1,69
392,4	378,45	28,5	50,05	1,66
441,45	426,77	28,37	49,83	1,62
490,5	475,1	28,23	49,62	1,59

Tabla 3. Deslizamiento y tensión de la banda trapezoidales de alto rendimiento

F (N)	T (N)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	Dz
49,05	39,7	29,3	51,43	1,7
98,1	88,22	29,22	51,38	1,51
147,15	136,51	29,15	51,33	1,38
196,2	185,14	29,08	51,28	1,25
245,25	233,47	29,02	51,25	1,09
294,3	281,79	28,95	51,18	0,99
343,35	330,12	28,92	51,13	0,98
392,4	378,45	28,85	51,03	0,94
441,45	426,77	28,78	50,93	0,91
490,5	475,1	28,72	50,83	0,87

En la Tabla 4 se indica la tensión de las bandas trapezoidales de perfil clásico y de alto rendimiento, y las calculadas teóricamente de acuerdo con los textos de diseño, mediante la ecuación (8) [3].

$$T = \frac{280159.39 \times Hd \times (e^{f\varphi} + 1)}{n \times d \times (e^{f\varphi} - 1)} \quad (8)$$

Donde, Hd es la potencia mecánica transmitida en caballos de fuerza (hp) obtenida midiendo el consumo eléctrico del motor multiplicado por su eficiencia que en este caso fue del 0,782 de acuerdo con el fabricante, a más fue incrementada en un 20 % debido al factor de servicio, n es la frecuencia de rotación de la polea conducida en revoluciones por minuto (rpm), d es el diámetro de la polea conducida en pulgadas, f es el coeficiente de fricción para bandas trapezoidales que es igual a 0,5123 [3], phi es el ángulo de contacto calculado con la ecuación (9).

$$\varphi = \pi - 2 \times \text{sen}^{-1} \frac{D - d}{2 \times C} \quad (9)$$

Donde, D es el diámetro de la polea conductora (la más grande) en milímetros (mm), d es el diámetro de la polea conducida (la más pequeña) en milímetros (mm) y C es la distancia entre centros de las poleas en milímetros (mm).

Tabla 4. Tensiones teóricas e inducidas experimentalmente en las bandas de perfil clásico y de alto rendimiento

T teórica de de la banda de perfil clásico (N)	T teórica de de la banda de alto rendimiento (N)	T inducida experimentalmente (N)
31,1	27,11	39,7
32,82	28,83	88,22
34,52	30,55	136,51
36,23	31,42	185,14
38,8	33,13	233,47
41,39	34,87	281,79
44,16	36,6	330,12
45,21	38,37	378,45
48,02	40,15	426,77
49,1	41,93	475,1

En la Tabla 4 se puede constatar que las tensiones teóricas son menores a las inducidas experimentalmente; por lo tanto, no debería existir deslizamiento; sin embargo, las Tablas 2 y 3 indican que si existió, corroborando las observaciones de [7, 8]. Por lo que, esta investigación es aplicable a cualquier condición de diseño de este tipo de sistemas.

En la Figura 6 se ha graficado los valores del deslizamiento en función del pretensado de las bandas trapezoidales tanto de perfil clásico como de alto rendimiento, a partir de los datos de las Tablas 2 y 3.

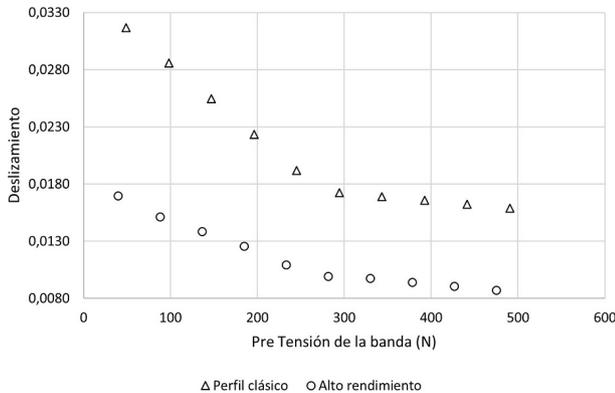


Figura 6. Deslizamiento en función de la pretensión de las bandas.

Para obtener el modelo matemático se parte de las siguientes condiciones:

El deslizamiento es un índice cuyo valor oscila entre el cero y uno; en el cual, a medida que la pretensión aumenta, el deslizamiento disminuye con una tendencia hacia cero sin que pueda alcanzar valores negativos, lo que significa que si la pretensión (T) tiende al infinito, el límite del deslizamiento (Dz) tiende a cero:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} Dz(T) = 0 \tag{10}$$

En el caso contrario, si no existiese pretensado (pretensado igual a cero) no se produce transferencia de potencia entre la polea conductora y conducida, por lo que esta última no tendría ningún movimiento. En este caso el deslizamiento adquiere su máximo valor de uno, lo que significa que la banda se desliza totalmente sobre la polea conducida sin transmitir movimiento.

$$Dz(T = 0) = 1 \tag{11}$$

Estas condiciones son cumplidas perfectamente por los modelos exponencial inversa, de los cuales por su flexibilidad se ha optado por la distribución del tipo:

$$Dz = e^{-(\alpha T)^\beta} \tag{12}$$

Donde α y β son parámetros del modelo de escala y de forma respectivamente.

La ecuación (12) puede asemejar a una función lineal aplicando logaritmos:

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{Dz} \right) \right) = \beta \ln(T) + \beta \ln(\alpha) \tag{13}$$

Donde se generan los datos graficados en la Figura 7, mismos que se ajustan a una línea recta con un coeficiente de correlación r de Pearson de 0,9767 para la banda de perfil clásico y de 0,9809 para la de alto rendimiento.

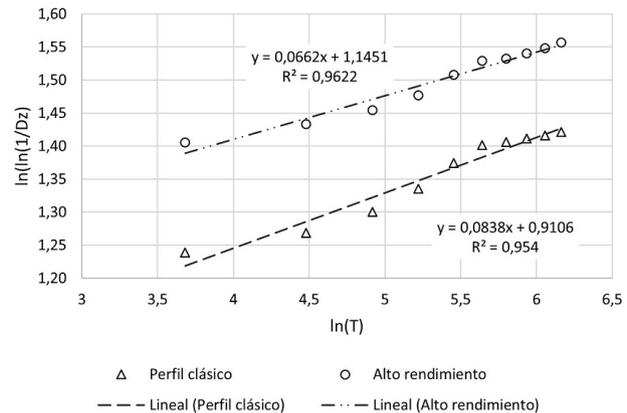


Figura 7. Linealización de la curva de deslizamiento en función de la pretensión de las bandas.

Mediante el método de los mínimos cuadrados y de acuerdo con la ecuación (13) y con los parámetros de linealización indicados en la Tabla 5, los modelos matemáticos deducidos se expresan a continuación, donde las ecuaciones (14) y (15) corresponden al cálculo del deslizamiento (Dz) en función del pretensado de las bandas (T) de perfil clásico y de alto rendimiento, respectivamente.

Tabla 5. Parámetros de linealización de las ecuaciones del deslizamiento en función de la tensión de la banda

Tipo de banda	Pendiente	Intersección	α	β
Perfil clásico	0,0838	0,9106	$5,27E^{+04}$	0,0838
Alto rendimiento	0,0662	1,1451	$3,19E^{+07}$	0,0663

$$Dz = e^{-(5,27E^{+04}T)^{0,0838}} \tag{14}$$

$$Dz = e^{-(3,19E^{+07}T)^{0,0663}} \tag{15}$$

Para la validación del ajuste de las ecuaciones (14) y (15) con los datos experimentales, se plantean las siguientes hipótesis:

H₀: El deslizamiento no es función exponencial inversa del pretensado de las bandas.

H₁: El deslizamiento es función exponencial inversa del pretensado de las bandas.

Se observa que el coeficiente de correlación r de Pearson de 0,9767 para la banda de perfil clásico y de 0,9809 para la de alto rendimiento, son mayores a 0,765 para un conjunto de diez datos, por tanto,

se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que sostiene que el deslizamiento es función exponencial inversa del pretensado de las bandas con una confianza del 99 % [22].

Al despejar el pretensado (T) de las ecuaciones (14) y (15), se obtienen los modelos matemáticos indicados en las ecuaciones (16) y (17) que constituyen el objetivo de esta investigación.

$$T = 1,91E^{-0.5} \times \left[\ln \left(\frac{1}{Dz} \right) \right]^{0,0838} \quad (16)$$

$$T = 3,13E^{-0.8} \times \left[\ln \left(\frac{1}{Dz} \right) \right]^{0,0663} \quad (17)$$

4. Conclusiones

Como se observa en las Tablas 2 y 3 y en la Figura 6, el deslizamiento producido por la misma tensión en las bandas de perfil clásico y de alto rendimiento son diferentes; sin embargo, tienen la misma tendencia. Esto lo corrobora el parámetro de forma β de la Tabla 5, ya que son similares.

El deslizamiento en los sistemas de transmisión de potencia por bandas y poleas, se ajusta al modelo matemático exponencial inverso con el 99 % de confianza; por lo que, es confiable utilizar las ecuaciones (14) y (15) para estimar el pretensado de las bandas a partir de la medición directa del deslizamiento sin la necesidad de apagar la máquina.

De acuerdo con las observaciones plasmadas en la Figura 6, los sistemas de transmisión por bandas de alto rendimiento son más eficientes que los sistemas por bandas de perfil clásico, hecho que se confirma en la figura citada por tener un menor deslizamiento.

Referencias

- [1] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. McGraw-Hill, México, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/fGK4tx>
- [2] A. J. Nieto Quijorna, *Elementos de máquinas*. Área de Ingeniería Mecánica, Universidad de Castilla-La Mancha, España, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/4wkZpd>
- [3] Budynas, R. G, N. J. Keith, and J. E. Shigley, *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, New York, USA, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/1TivVq>
- [4] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson Education, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/buKXz3>
- [5] R. C. Juvinall, *Diseño de elementos de máquinas*. Limusa Wiley, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/xtrD3K>
- [6] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*. McGraw-Hill Education, India, 2016.
- [7] A. D. Almeida and S. Greenberg, "Technology assessment: energy-efficient belt transmissions," *Energy and Buildings*, vol. 22, no. 3, pp. 245–253, 1995. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00926-0](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00926-0)
- [8] C. A. Silva, M.-A. Andrianoely, L. Manin, S. Ayasamy, C. Santini, E. Besnier, and D. Remond, "Optimization of power losses in poly-v belt transmissions via genetic algorithm and dynamic programming," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 128, pp. 169–190, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.016>
- [9] O. Reynolds, "On the efficiency of belts or straps as communicators of work," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 99, no. 2, pp. 142–145, 1875. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(75\)90662-6](https://doi.org/10.1016/0016-0032(75)90662-6)
- [10] G. Gerbert, "A note on slip in v-belt drives," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 98, no. 4, pp. 1366–1368, 1976. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.3439115>
- [11] —, "Paper xii (i) on flat belt slip," in *Vehicle Tribology*, ser. Tribology Series, D. Dowson, C. Taylor, and M. Godet, Eds. Elsevier, 1991, vol. 18, pp. 333–340. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70149-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70149-4)
- [12] —, "Belt slip—a unified approach," *Journal of Mechanical Design*, vol. 118, no. 3, pp. 432–438, 1996. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.2826904>
- [13] H. Belofsky, "On the theory of power transmission by v-belts," *Wear*, vol. 39, no. 2, pp. 263–275, 1976. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90054-5)
- [14] T. H. C. Childs and D. Cowburn, "Power transmission losses in v-belt drives part 2: Effects of small pulley radii," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering*, vol. 201, no. 1, pp. 41–53, 1987. [Online]. Available: https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1987_201_156_02
- [15] W.-H. Chen and C.-J. Shieh, "On angular speed loss analysis of flat belt transmission system by finite element method," *International Journal*

- of *Computational Engineering Science*, vol. 04, no. 01, pp. 1–18, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1142/S1465876303000752>
- [16] B. Balta, F. O. Sonmez, and A. Cengiz, “Speed losses in v-ribbed belt drives,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 86, pp. 1–14, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.016>
- [17] G. Čepon, L. Manin, and M. Boltežar, “Experimental identification of the contact parameters between a v-ribbed belt and a pulley,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 10, pp. 1424–1433, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.05.006>
- [18] L. Bertini, L. Carmignani, and F. Frendo, “Analytical model for the power losses in rubber v-belt continuously variable transmission (cvt),” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 78, pp. 289–306, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.016>
- [19] Optibelt, “Manual técnico para transmisiones por correas trapeciales,” Optibelt Power Transmission, Tech. Rep., 2008.
- [20] Gates, “Mantenimiento preventivo de correas y transmisiones,” Gates Corporation, Tech. Rep., 2009.
- [21] E. Hernández, B. Angulo, P. Fiallos, and V. Chávez, “Método para el cálculo del costo de la indisponibilidad en procesos productivos,” *Perfiles*, vol. 1, pp. 90–98, 2017.
- [22] M. F. Triola, *Estadística*. Pearson Education, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/Zfkisc>



ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE ISDB-T UTILIZANDO MODULACIONES OFDM Y CC-OFDCM

ANALYSIS AND COMPARATION OF ISDB-T USING MODULATIONS OFDM AND CC-OFDCM

José Gómez¹, Holger Lapo¹, Luis Oñate^{1,*}

Resumen

La Televisión Digital Terrestre está orientada a sustituir las transmisiones de televisión analógica, al utilizar la modulación OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales), con esta modulación se puede realizar transmisiones para equipos fijos y móviles. Sin embargo, en el caso de sistemas de recepción de televisión digital como teléfonos inteligentes, portátiles y otros dispositivos móviles tienen problemas en la recepción causados por el efecto multicamino. En este proyecto se realiza la simulación de las modulaciones OFDM y CC-OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales mediante Codificación por Convolución) para el estándar de televisión ISDB-T (Radiodifusión Digital de Servicios Integrado para Televisión). Por medio de Simulink del entorno Matlab, se simuló los diagramas de bloques de ambas arquitecturas para observar los resultados al transmitir datos, midiendo el BER (Tasa de Bit Errado), el retardo y el número de portadoras, bajo los siguientes canales: AWGN (Ruido Gaussiano Blanco Aditivo), Terreno tipo A (terreno rural) y Terreno tipo C (terreno urbano). De los resultados obtenidos se muestra que la modulación CC-OFDM tiene una mayor eficiencia, debido a que presenta un BER mayor y reducción en el retardo en la recepción.

Palabras clave: CC-OFDM, ISDB-T, Multicamino, OFDM, Simulink

Abstract

Digital Terrestrial Television (DTT) is focused on replacing analogue television transmissions, however, with the modulation used OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), transmissions can be made for fixed equipment. However, in the case of digital television reception systems such as smartphones, laptops and other mobile devices have reception problems caused by the multipath effect. In this project, the OFDM and CC-OFDM modulations (Orthogonal Frequency Division Multiplexing by Convolution Coding) are implemented in software Simulink for the ISDB-T (Integrated Services Digital Television Broadcasting) standard. By means of Simulink de Matlab the respective block diagrams of their architectures were implemented to observe the results when transmitting data, measuring the BER (Bit Error Rate), the delay and the number of carriers, under three types of channels such as: AWGN (Additive White Gaussian Noise), Type A land (rural land) and Type C land (urban land) in order to observe which modulation presents the best efficiency. From the obtained results it is shown that CC-OFDM modulation has a higher efficiency, because it has a higher BER and reduction in the reception delay.

Keywords: CC-OFDM, ISDB-T, Multiway, OFDM, Simulink.

^{1,*}Carrera de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: lonate@ups.edu.ec. <http://orcid.org/0000-0003-0741-2115>, <http://orcid.org/0000-0002-4885-4414>, <http://orcid.org/0000-0002-1323-1858>

Recibido: 22-10-2018, aprobado tras revisión: 12-12-2018

Forma sugerida de citación: Gómez, J.; Lapo, H. y Oñate, L. (2019). «Análisis y comparación de ISDB-T utilizando modulaciones OFDM y CC-OFDCM». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 71-77. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.07>.

1. Introducción

La televisión digital está orientada a sustituir las transmisiones de televisión analógica porque tiene la ventaja de incluir aplicaciones interactivas como son las encuestas, la programación y sus horarios, señales de emergencia entre otros, así como diferentes tipos de calidad de la señal en alta definición (HD) y definición estándar (SD) [1].

Cuando se reciben señales de televisión digital en dispositivos como teléfonos inteligentes, portátiles entre otros se tienen problemas de ruido impulsivo causados por la trayectoria multicamino en el estándar ISDB-T al utilizar la modulación habitual OFDM [2].

El estándar ISDB-T (Radiodifusión Digital de Servicios Integrado para Televisión) tuvo sus orígenes en Japón habiendo sido desarrollado en los últimos años de la década de 1990. El objetivo principal de este estándar de televisión digital fue lograr que HDTV (TV de Alta Definición) y la SDTV (TV Digital Estándar) simultáneamente se transmitan. ISDB-T fue diseñado para funcionar en canales con un ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz respectivamente. En el Ecuador este estándar debe trabajar con un canal de 6 MHz [3].

En la última década la multiplexación por división de frecuencia (OFDM) se ha constituido en la base de los sistemas de telecomunicaciones y que es una técnica utilizada en los sistemas de transmisión inalámbrico [4] y en los de fibra óptica [5]. Las ventajas de OFDM son el manejo de interferencia multicamino, la mitigación de la interferencia intersímbolo (ISI) causada por la tasa de bits errados en la frecuencia selectiva en ambientes con desvanecimiento [6] OFDMA es una técnica multiportadora de transmisión el cual es reconocida como una de las mejores para redes inalámbricas bidireccionales en sistemas de comunicaciones y para transmisión de televisión digital tipo broadcasting en especial en el sistema de televisión ISDB-t de uso en Ecuador, además, se utiliza en comunicaciones satelitales y espaciales, reduciendo el error en las mismas. En la transmisión digital y almacenamiento de datos el criterio de calidad utilizado es la tasa de error de bit (BER) comparando el número de bit errados y el número de bits transmitidos.

Las transmisiones de televisión terrestre digital tipo *broadcasting* tiene a ser reflejada por edificios y montañas; la propagación tiende a convertirse en multicamino. Para lograr evitar la interferencia, la televisión digital ISDB-t que es utilizado en nuestro país se basa en el sistema del Japón con la revisión del Brasil, utiliza OFDM como esquema de modulación. Esta técnica no es robusta y presenta problemas que en transmisiones multicamino genera grandes retardos los cuales pueden exceder el intervalo de guarda (GI) o picos elevados de la potencia de transmisión [7]. Si se producen picos en el dominio del tiempo ya que muchas componentes de subportadoras son añadidas al utilizar la operación de

la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) [8]. Más allá de esto los sistemas OFDM se caracterizan por tener un alto PAPR (relación entre potencia pico y potencia promedio) con respecto a sistemas con una sola portadora. Al pasar por un elemento no lineal las señales con un alto PAPR OFDM tal es el caso de un amplificador de alta potencia (HPA), [9] provoca una señal que esta fuera del rango del espectro de las portadoras que interferirá con los canales adyacentes, y dentro del espectro de las portadoras lo que causa distorsión, atenuación y un nivel de corriente continua (*offset*) en la señal recibida. El HPA con un rango dinámico grande provoca que las pérdidas en el sistema de comunicación sean altas. Se puede reducir con componentes que tengan bajas perdidas, pero eso lo vuelve muy costoso. El efecto del desvanecimiento se logra compensar utilizando CC-OFDM [10].

La modulación CC-OFDM en el sistema de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) se transformó en una herramienta muy utilizada en la tecnología actual. De igual manera, que otros sistemas de comunicación, el sistema OFDM requiere usar la codificación de canal para disminuir el BER como el CC-OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales mediante Codificación por Convolución) [11]. En la Figura 1 se observa el diagrama de bloques de la modulación CC-OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales mediante Codificación por Convolución) [12].

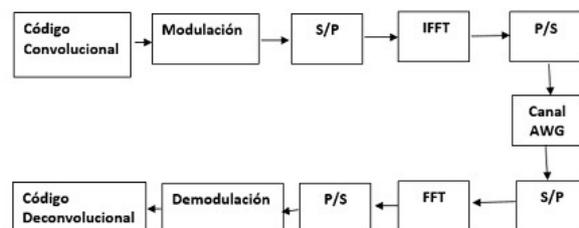


Figura 1. OFDM con el código de convolución.

En el artículo utilizando las arquitecturas ISDB-t se realiza un análisis y simulación para establecer en qué medida mejora la eficiencia en el ambiente multicamino, además de observar parámetros al como el BER, delay y número de portadoras utilizando la modulación CC-OFDM.

El diagrama de bloques que se observa en la Figura 1 está formado por: el generador del código de Convolutión el cual es un tipo de código de corrección de errores, la modulación en este caso es 64 QAM, aunque se puede utilizar otros tipos de modulaciones como QPSK, QAM, 16 QAM, 32 QAM, un convertor Serial a Paralelo (P/S), Transformada Rápida de Inversa Fourier (IFFT), canal que es el medio de transmisión por el cual se transmite los datos donde se introducirá atenuación, ruido y desvanecimiento de la

señal, un conversor Paralelo a Serial (S/P), Transformada Discreta de Fourier (DFT), un segundo conversor (P/s), demodulación y, finalmente, la decodificación del código convolucional [13].

2. Materiales y métodos

En el modelo ISDB-T se debe tener en cuenta los parámetros y valores configurables para el estándar ISDB-T ya que al seleccionarlos se definirá completa-

mente el modo de operación de los bloques del sistema como se describe en el documento [14]. Se observa en la Figura 2 el diagrama de bloques de transmisión y recepción para el estándar ISDB-T con modulación OFDM elaborado en Simulink de Matlab. Los bloques empleados en la simulación del estándar ISDB-T con modulación OFDM se detallan a continuación:

El generador de imagen emplea el bloque *Signal From Workspace* que es el encargado de importar los datos de la imagen desde el Workspace de Matlab [15].

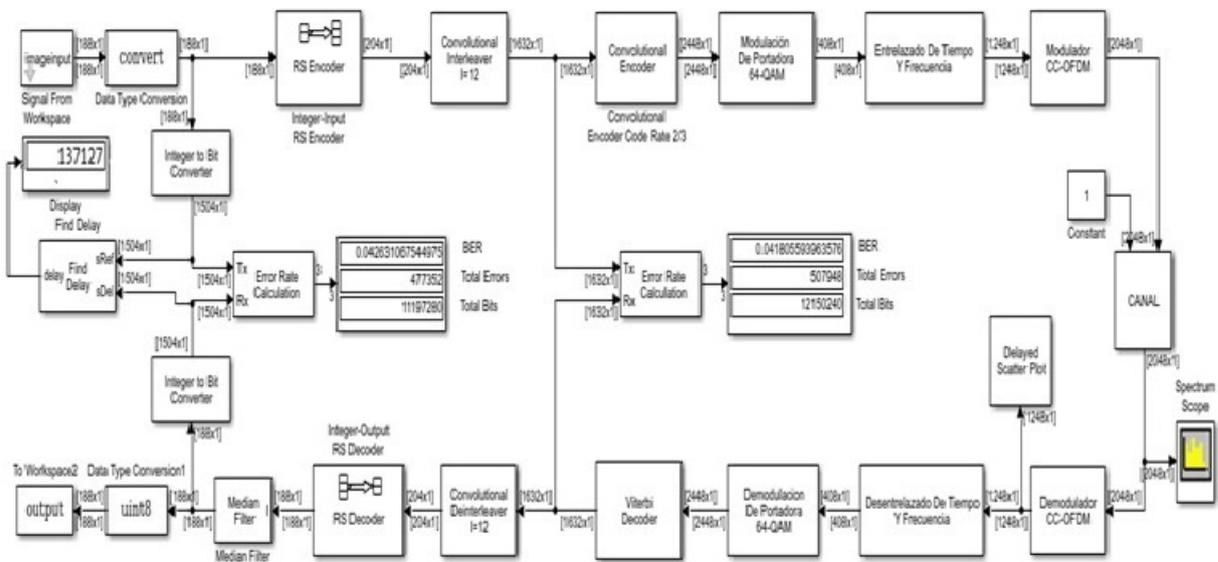


Figura 2. Diagrama de bloques para el estándar ISDB-T con modulación OFDM elaborado en Simulink de Matlab.

El codificador Reed Solomon realiza un proceso de corrección de errores basado en bloques, permitiendo procesar por bloques una cierta cantidad de símbolos de datos. Para este caso emplea un código de la forma $k/n = 188/204$ [16].

El convertidor de enteros a bits establece un valor de 8, para obtener un total 1632 bits valor requerido en la norma [17]. La modulación de portadora emplea un bloque llamado *matrix interleaver* que hará el proceso de entrelazado de bits. Para posteriormente realizar el proceso de *mapping* que consta de dos bloques, un conversor de bit a entero y un modulador rectangular QAM, para tener una modulación 64-QAM es necesario colocar el valor de 6 el conversor de bits a enteros, así como también ingresar el valor de 64 en el modulador QAM [18].

El entrelazado de tiempo y frecuencia consta de un *buffer*, en donde se ingresan el número de filas y columnas indicados por el estándar (96×204), realizan una conversión serial a paralelo. El bloque *matrix interleaver* contiene las filas y columnas antes mencionadas para poder transmitir correctamente los datos. Finalmente, se tiene un segundo *buffer* que almacena los

1248 datos que pertenecen al estándar [19].

En la modulación OFDM se asigna el número total de portadoras (2048), luego se ingresan en el parámetro número de bandas de guarda el valor de $[400; 400]$, que permitirá obtener los 1248 datos que usa el simulador.

Se observa en la Figura 3 el diagrama de bloques de transmisión y recepción mencionados previamente para CC-OFDM [20].

En el canal AWGN adicionalmente se implementó una línea de 3 *taps* que indica el proceso del efecto multicamino denominados canales SUI (Stanford University Interim); además, un bloque AWGN Channel que ingresa ruido blanco gaussiano aditivo. Se utiliza un modelo de comunicaciones por radio frecuencia que puede ser utilizado en Wimax, televisión digital, comunicaciones inalámbricas a larga distancia [21]. El demodulador OFDM realiza el proceso inverso de la modulación OFDM. En el desentrelazado de tiempo y frecuencia se realiza un proceso inverso en el cual se debe obtener a la salida un vector de $[272 \times 1]$ que debe ser igual a lo indicado en el proceso de transmisión y pasar a la siguiente etapa [22].

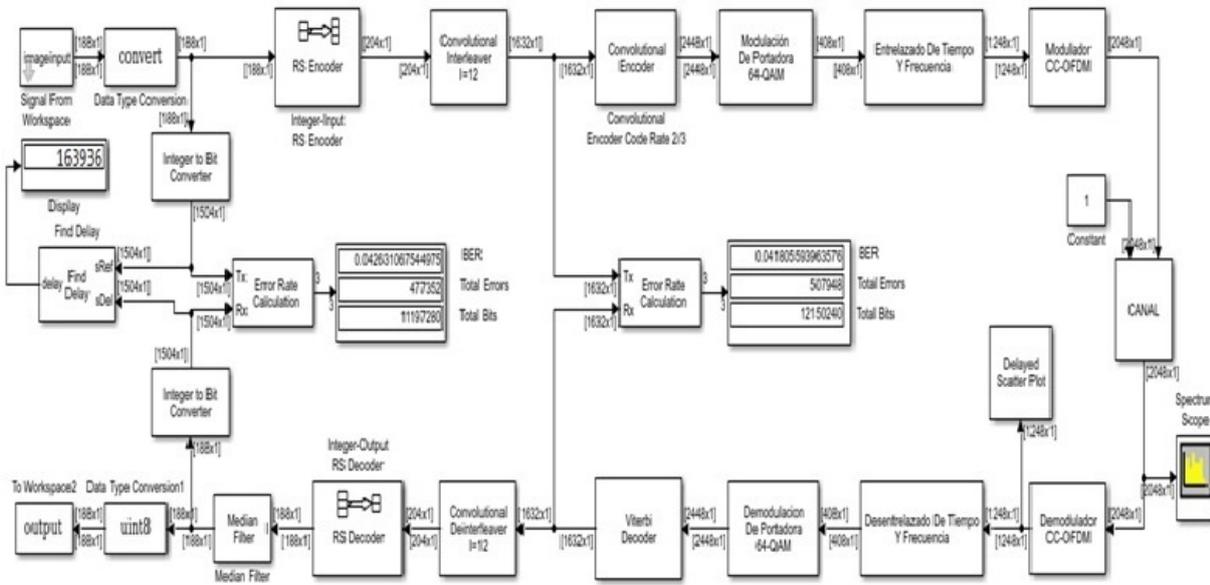


Figura 3. Diagrama de bloques para el estándar ISDB-T con modulación CC-OFDM elaborado en Simulink de Matlab.

La demodulación de portadora en este subsistema se realiza el desentrelazado de bits con el bloque *matrix deinterleaver* para posteriormente demodula a 64-QAM con el bloque demodulador rectangular QAM. El convertidor de bits a enteros convierte los 1632 bits ingresados en el *matrix deinterleaver* a 204 enteros que se necesita en el siguiente bloque [23]. El decodificador Reed Solomon recupera un vector con mensaje binario, los parámetros deben concordar con los valores de la entrada del codificador Reed Solomon, para obtener los mismos enviados [24]. El filtro mediano emplea un bloque *Median Filter* que se utilizó para disminuir el efecto de sal y pimienta que presentaban las imágenes recibidas y que se introduce en el canal de comunicaciones, para lo cual se encuentra la media de los pixeles de las imágenes procesadas y aproxima mediante un kernel los valores de los pixeles cercanos disminuyendo el ruido [25]. En la presentación de la imagen transmitida contiene el bloque *To Workspace* cuya finalidad es para el estándar ISDB-T con modulación CC-OFDM en Simulink de Matlab.

Los bloques de Simulink con modulación CC-OFDM usan para la corrección de errores de entrelazado y desentrelazado de bits. Además, se agrega un codificador Convolutivo y su inverso un decodificador Viterbi, para obtener una menor tasa de errores [26]. El entrelazador convolutivo contiene el bloque Convolutional Interleaver ejecuta un entrelazado convolutivo de bytes para mejorar el desempeño contra errores. El codificador convolutivo se aplicó un vector de Puzonado eligiendo una tasa de codificación de 2/3 con una extensión de 7 bits de convolución [12]. El bloque Viterbi Decoder es utilizado para decodificar la señal que fue codificada por el codificador convolutivo, em-

pleando el algoritmo Viterbi. Este decodificador utiliza las características del Trellis de código convolutivo, este algoritmo Viterbi reduce la complicación de los cálculos evitando tomar en cuenta todas las secuencias posibles [27]. El desentrelazador convolutivo reordena los símbolos de una señal que fue entrelazada empleando registros de desplazamiento cada uno con retraso fijo.

3. Resultados y discusión

Los resultados del BER para los diferentes estándares TDT y sus respectivas modulaciones con una señal a ruido de 19 [dB], ya que este valor permitirá obtener una imagen clara con bajo ruido. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del Bit Error Rate

Estándar	ISDB-T (BER)	
	OFDM	CC-OFM
SNR[dB]		
19	0,04333	0,04263

Se realizaron cálculos con una SNR = 16 [dB] [22] ya que este valor permitirá obtener la mejor eficiencia al aplicar efecto multicamino, en el terreno A como en el terreno C.

Para cada una de las modulaciones respectivas de los estándares de TDT estudiados se obtiene la siguiente Tabla 2 que indica el valor del retardo correspondiente en segundos.

Tabla 2. Resultados del Bit Error Rate

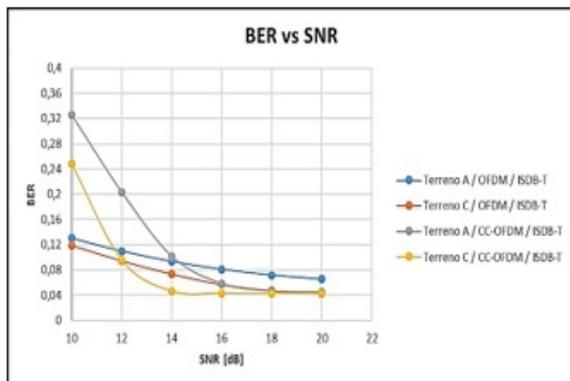
Estándar	ISDB-T (BER)	
Modulaciones	OFDM	CC-OFM
Delay	6,9963 [ms]	8,3640 [ms]

Teniendo como señal de entrada una imagen RGB se obtuvo los diferentes resultados entre BER vs. SNR en el cual se consigue resultados distintos debido a la variación que se produce en la relación señal a ruido. Esta variación se la realiza en los 2 canales SUI (Standford University Interim) implementados en la simulación con el fin de observar cuál de los estándares tiene mejor comportamiento ante este efecto multicamino como se observa en la Tabla 3. Siendo el BER menor en CC-OFDM.

Tabla 3. Resultados del BER vs. SNR [dB] con efecto multicamino

SNR Db	ISDB-T			
	OFDM VER		CC-OFM VER	
	Terreno A	Terreno C	Terreno A	Terreno C
10	0,13040	0,11866	0,32612	0,24866
12	0,10997	0,09436	0,20365	0,09556
14	0,09357	0,07342	0,10164	0,04618
16	0,08112	0,05699	0,05799	0,04277
48	0,07194	0,04702	0,04650	0,04263
20	0,06546	0,04291	0,04439	0,04263

En la Figura 4 se muestran los resultados pertinentes para el estándar ISDB-T, donde se observa que tanto la curva del terreno A (urbano) y terreno C (rural), de color gris y amarillo respectivo tienen para un SNR de 16 dB una mejor respuesta del VER con la modulación CC-OFDM con respecto a las curvas en los mismos tipos de terrenos con la modulación OFDM. Usando esta modulación en multicamino se logra transmitir imágenes con menor ruido sal y pimienta.

**Figura 4.** BER vs. SNR con imagen RGB de señal de entrada aplicando efecto multicamino para el estándar ISDB-T.

En la Tabla 4 se observa que CC-OFDM es más eficiente en ambos terrenos.

Tabla 4. Resultados del BER vs. SNR [dB] con efecto multicamino

SNR Db	ISDB-T			
	OFDM VER		CC-OFM VER	
	Terreno A	Terreno C	Terreno A	Terreno C
16	91,887	94,300	94,201	95,273

A continuación, se observan los resultados obtenidos en una imagen con una variación de SNR=16 [dB], para un terreno tipo C (urbano). En la Figura 5 se observa la imagen transmitida, en la Figura 6 se observa la imagen recibida con OFDM, y en la Figura 7 la imagen recibida con CC-OFDM.

Teniendo como señal de entrada una imagen RGB se obtuvo los diferentes resultados entre BER vs. SNR en el cual se consigue resultados distintos debido a la variación que se produce en la relación señal a ruido. Esta variación se la realiza en los 2 canales SUI (Standford University Interim) implementados en la simulación con el fin de observar cuál de los estándares tiene mejor comportamiento ante este efecto multicamino como se observa en la Tabla 3. Siendo el BER menor en CC-OFDM.

**Figura 5.** Imagen de entrada original.**Figura 6.** Imagen al pasar por el terreno C con SNR=16 [dB] con modulación OFDM.



Figura 7. Imagen al pasar por el terreno C con SNR=16 con modulación CC-OFDM.

4. Conclusiones

Para un sistema OFDM se tiene un número muy alto de portadoras para el estándar ISDB-T, ya que el ancho de banda establecido a cada portadora es reducido, disminuyendo la velocidad de símbolo de manera proporcional, aumentando el tiempo para transmitir cada símbolo, por esta razón este sistema tiene más flexibilidad a interferencias por multicamino.

Se concluyó que aplicando una modulación CC-OFDM para el estándar ISDB-T es 24,95 % más eficiente que OFDM según el BER obtenido en la simulación para un terreno urbano con un delay de 8,3640 [ms] siendo más confiable, pero con un 16,35 % más de retardo con respecto a la modulación

Referencias

- [1] M. Fuentes Muela, *Evaluación de prestaciones (rendimiento e interferencias) del estándar de Televisión Digital Terrestre ISDB-Tb, mediante simulaciones y mediciones*. Proyecto final de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/LQyMFm>
- [2] N. O. Pisciotta, “Remultiplexor isdb-tb,” *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, no. 12, pp. 57–69, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/5UdD74>
- [3] —, “Sistema isdb-tb. (primera ppart),” *UBP Serie Materiales de Investigación*, no. 9, pp. 1–45, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/Tktnh9>
- [4] S. Hara and R. Prasad, *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2003. [Online]. Available: <https://goo.gl/iLGLJj>
- [5] J. Armstrong, “OFDM for optical communications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 189–204, Feb 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010061>
- [6] M. Engels, *Wireless OFDM Systems: How to Make Them Work?* Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [7] V. Sharma, A. Shrivastav, A. Jain, and A. Panday, “Ber performance of ofdm-bpsk,-qpsk,- qam over awgn channel using forward error correcting code,” *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 2, no. 3, pp. 1619–1624, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/2Fs5AU>
- [8] M. Taguchi, K. Murayama, T. Shitomi, S. Asakura, and K. Shibuya, “Large-capacity wireless transmission technology,” *ITE Transactions on Media Technology and Applications (MTA)*, vol. 1, no. 1, pp. 34–39, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/XJnDxo>
- [9] A. Joshi and D. S. Saini, “Performance analysis of coded ofdm for various modulation schemes in 802.11a based digital broadcast applications,” in *Information Processing and Management*, V. V. Das, R. Vijayakumar, N. C. Debnath, J. Stephen, N. Meghanathan, S. Sankaranarayanan, P. M. Thankachan, F. L. Gaol, and N. Thankachan, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 60–64. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12214-9_11
- [10] K. Thenmozhi and V. Prithiviraj, “Suitability of coded orthogonal frequency division multiplexing (cofdm) for multimedia data transmission in wireless telemedicine applications,” in *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2007)*, vol. 4, Dec 2007, pp. 288–292. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCIMA.2007.166>
- [11] M. D. Hassib, J. Mandeep, M. Abdullah, M. Ismail, R. Nordin, and M. Islam, “Improved concatenated (rs-cc) for ofdm systems,” *IEICE Electronics Express*, vol. 9, no. 6, pp. 538–543, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1587/elex.9.538>
- [12] F. Tarrés and C. M., *Codificación de canal II: códigos convolucionales*. Universidad Oberta de Catalunya, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/J2WMP9>
- [13] S. S. Joshi and A. P. Laturkar, “Ber improvement in ofdm using coding techniques,” *International Journal of Electrical and Electronics Research*, vol. 2, no. 3, pp. 167–173, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/Q22qJ2>

- [14] L. R. Cantos Sanchez, S. J. Tapuy Rendon, and B. Ramos Sanchez, *Simulación Del Estándar de Televisión Digital ISDB-Tb Basado En Un Esquema De Modulación/ Demodulación OFDM Implementado en Matlab-Simulink*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/mA12pc>
- [15] P. S. Calderón Valarezo, *Análisis del Desempeño de la Técnica OFDM Sobre Canales Dispersos*. Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/vVu1PC>
- [16] J. Espitia Juarez, *Codificador Reed-Solomon en software*. Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/egNKbN>
- [17] C. Mateos, *Simulador de un sistema de Transmisión, Recepción y ecualización de DVB-T en Simulink*. Tesis de grado, Universidad de Sevilla. España, s.f. [Online]. Available: <https://goo.gl/WPJfWW>
- [18] A. Delgado Gutiérrez, *Transmisión de señales de TV Digital en el Estándar Terreno DVB-T*. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2002. [Online]. Available: <https://goo.gl/Rwpq6N>
- [19] D. Argüellos and J. A., *Simulación del diagrama funcional de transmisión del sistema ISDB-T, para el estudio de su estructuración*. Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela, Venezuela., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/tu83My>
- [20] N. Pérez, *Gestión del espectro radioeléctrico para TV Digital*. Universidad de los Andes, Venezuela., 2013.
- [21] S. Landeros-Ayala, S. A. Chávez-Cárdenas, and J. C. González-Sánchez, “Análisis de la eficiencia de los estándares de transmisión de televisión digital.” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 14, no. 3, pp. 335–353, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/sw7jxt>
- [22] DIBEG. (2018) Comparison of 3 DTTB systems. Digital Broadcasting Experts Group. [Online]. Available: <https://goo.gl/rJomDY>
- [23] CRC, *Definición de las especificaciones técnicas de la TDT en Colombia*. Comisión de Regulación de Comunicaciones, Colombia., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/A5iy6T>
- [24] R. G. Acosta Arias, *Estudio Teórico Practico de los códigos no binario de Reeds-Solomon*. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador., 1994. [Online]. Available: <https://goo.gl/nMohzK>
- [25] MathWorks. (2018) Communications toolbox – examples. The MathWorks, Inc. [Online]. Available: <https://goo.gl/RY85fW>
- [26] A. F. Padilla Narváez, *Detección y corrección de errores en códigos convolucionales mediante el algoritmo de Viterbi usando una microcomputadora*. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador., 1985. [Online]. Available: <https://goo.gl/9nLXYm>
- [27] L. Arnone, C. Gayoso, C. González, J. C. García, and J. Castiñeira, *Diseño De Un Decodificador Viterbi Para Ser Utilizado En Enlaces Infrarrojos*. Universidad Nacional del Mar del Plata., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/gK3bMk>



MIGRACIÓN HACIA NGN EN LA PROVINCIA GRANMA

MIGRATION TO NGN IN THE GRANMA PROVINCE

Randy Verdecia Peña¹

Resumen

Debido a la necesidad de introducción e integración de la red de la provincia Granma, hacia una red NGN, como solución a las deficiencias en la infraestructura de la misma, en el presente trabajo se brinda una propuesta de Red de Nueva Generación para la provincia Granma partiendo de las condiciones actuales de esta y considerando la existencia del dorsal nacional IP/MPLS como transporte. Primeramente, se analiza la estructura del modelo NGN, así como sus características, facilidades y protocolos de señalización. Posteriormente se realiza un profundo análisis del equipamiento propuesto por el fabricante Huawei, evaluando la disponibilidad y las potencialidades de esta tecnología. Finalmente, se exponen elementos que contribuyen a la migración de la red de telecomunicaciones actual de Granma hacia una red NGN.

Palabras clave: Provincia Granma, solución, red de nueva generación (NGN), IP/MPLS, nodo de acceso multiservicio (MSAN), migración hacia NGN.

Abstract

Due to the need of introducing and integrating the province network into a Next Generation Network, as a solution to the deficiencies of its infrastructure, in this paper a proposal for a Next Generation Network for Granma province is done, based on its current conditions and considering the existence of the IP/MPLS national backbone as transport. Firstly, the Next Generation Network model structure features, facilities and signaling protocols are analyzed. Secondly, a detailed analysis of the equipment proposed by the Huawei manufacturer is performed, evaluating the availability and potentials of this technology. Finally, elements that contribute to the migration of the current telecommunications network in Granma Province to a Next Generation Network are discussed.

Keywords: Granma Province, Solution, Next Generation Network (NGN), IP/MPLS, Multiservice Access Node (MSAN), NGN migration.

^{1,*}Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Estudios en Telecomunicaciones (CETUC), Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro. Río de Janeiro - Brasil. Autor para correspondencia ✉: randy.verdecia@cetuc.puc-rio.br.
 <http://orcid.org/0000-0003-4798-2681>.

Recibido: 17-12-2018, aprobado tras revisión: 05-11-2018

Forma sugerida de citación: Verdecia Peña, R. (2019). «Migración hacia NGN en la provincia Granma». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 78-87. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.08>.

1. Introducción

En la actualidad, el sector de las telecomunicaciones está inmerso en una significativa e intensa evolución, originada principalmente por los cambiantes y cada vez más exigentes requerimientos de los clientes [1]. Esta evolución implica que los operadores de telecomunicaciones deban mejorar constantemente sus redes para satisfacer las necesidades de quienes esperan cada vez más y mejores servicios [2, 3].

Del lado de la demanda, el crecimiento se ve impulsado por la penetración de las telecomunicaciones y la tecnología de la información en todos los aspectos de la vida humana, en todos los sectores de la actividad económica y social [4–6], administración pública [7], provisión de servicios públicos y gestión de infraestructuras públicas [8], la enseñanza [9, 10], salud [11] y la expresión cultural, gestión del entorno y emergencias, sean naturales o provocadas por el hombre. Del lado de la oferta, el crecimiento se ve impulsado por la rápida evolución tecnológica que mejora constantemente la eficacia de los productos, sistemas y servicios existentes y crea las bases para un flujo continuo de innovaciones en cada uno de estos sectores [12].

En los últimos años ha ocurrido un continuo aumento del volumen de tráfico de la información en las redes de telecomunicaciones, debido principalmente a la proliferación de nuevas aplicaciones que combinan voz, datos y video. El tráfico de datos (la demanda del mercado) aumenta, tanto en el segmento residencial como en el sector empresarial, como resultado fundamentalmente de una combinación de los servicios de datos tradicionales, del tráfico de acceso a Internet y del comercio electrónico. Este crecimiento de la demanda de ancho de banda, unido a las exigencias en las prestaciones asociadas, requiere un replanteamiento de las redes públicas existentes y de un proyecto que satisfaga las demandas.

En términos de evolución, la NGN (*Next Generation Network*) es un paso en el cambio de la red de conmutación de circuito tradicional PSTN (*Public Switched Telephone Network*) a la red IP (*Internet Protocol*) basada en paquetes. En este significado, NGN es la integración de la red de voz basada en TDM (*Time Division Multiple*) y la red de paquete basada en IP/ATM (*Internet Protocol/ Asynchronous Transfer Mode*) [3, 13].

En Cuba, el desarrollo de su infraestructura telefónica y de redes de datos, ha estado a cargo de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA), hace algunos años comenzó un intenso plan de inversiones dedicado a implementar modernas soluciones que le permitan integrar los servicios telefónicos y de datos en un solo sistema y mejorar así las prestaciones a los clientes [14].

Una de las principales deficiencias que presenta la red de telecomunicaciones de la provincia Granma es

la coexistencia de dos redes paralelas, la de telefonía y la de datos, esto dificulta la gestión de los recursos e impide, en muchos casos, la implementación de nuevos servicios basados en la tecnología IP. Teniendo lo anteriormente planteado, el objetivo de esta investigación es proponer una solución para la migración de la red de telecomunicaciones de la provincia Granma hacia una red NGN.

2. Materiales y métodos

La red de telecomunicaciones de la provincia Granma está conformada fundamentalmente por cuatro anillos, el 93 % de los municipios utilizan como medio de transmisión para el transporte de la información la fibra óptica, la cual emplea como tecnología de transporte SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Esta red consta de 63 elementos de conmutación, los cuales están soportados por 80 dispositivos de transmisión del fabricante Huawei como son: OSN 3500, OSN 2500, metro 2050, metro 1000, metro 100, metro 500. Para la conmutación de la voz la red consta de una tándem provincial C&C08 de Huawei ubicada en Bayamo.

Por otro lado, la red de datos está conformada por dispositivos DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) IP distribuidos por toda la provincia, los mismos se conectan a la red nacional con un enlace redundante mediante un enrutador NE-40, uno con la provincia Santiago de Cuba y el otro con Holguín. Toda esta red está concebida por la existencia del dorsal nacional IP/MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) como red de transporte.

La red NGN es una red de paquetes capaz de proveer servicios de telecomunicaciones de banda ancha a usuarios de diferentes proveedores. Su ventaja fundamental es hacer que todos los servicios, tanto de voz como de datos, converjan en una sola red. Su arquitectura es basada en cuatro capas fundamentales que, junto con los protocolos de señalización, logran su correcto funcionamiento. Entre estos protocolos se pueden citar: H.248, H.323, SIP [15].

Hace algunos años se realizó una propuesta para una migración hacia NGN, en la cual se recomienda usa como enrutador de borde un NE40 de Huawei el cual tiene que realizar toda la agregación de la red en ese punto, el mismo no tiene la capacidad para realizar tal función ya que debe manejar todo el tráfico de la provincia. En el trabajo no se precisan los sitios de la provincia donde podría instalarse dicha tecnología (MSAN IP), con el fin de lograr la migración hacia esta red, tampoco hace referencia a la cantidad de líneas POTS, ADSL2+ y SHDSL necesarias. Por consiguiente, no se calcula la velocidad de transmisión que se deberá utilizar en los diferentes enlaces de datos en la provincia Granma.

Existen diferentes proveedores de servicios que han

brindado una solución para este tipo de red, pero el fabricante Huawei ofrece una solución completa de este modelo de red acorde con las posibilidades de la economía del país. A tal efecto este proveedor brinda una serie de dispositivos tales como: UMG8900, Softswitch3000, UA5000, que hacen que esta red sea flexible como es descrito en [16–18].

3. Resultados y discusión

Teniendo en cuenta la situación actual de la red de telecomunicaciones de la provincia de Granma, así como la existencia del dorsal IP/MPLS, del Softswitch y las posibilidades que brinda el fabricante Huawei, se conformó la propuesta de migración hacia NGN de la provincia de Granma. Para la propuesta de migración se utilizó el CX300 el cual es el elemento que realizará toda la conmutación tanto de la voz como de los datos. Además, este dispositivo será el encargado de comunicarse con la red nacional. En la central digital está ubicada la pasarela de medio UMG8900 con 32 flujos E1, conectados a la central digital C&C08, elemento por el cual se comunicará el mundo IP con el TDM. Otros elementos a utilizar son los MSAN IP, los cuales se desplegarán por toda la provincia.

Para los abonados de datos la solución actual se mantiene, pues permanecerán los DSLAM IP para la conectividad, los mismos se insertarán al mundo IP a través del enrutador de borde al igual que los MSAN IP. Para extender los servicios propios de las NGN a todas las URA conectadas a la C&C08, todo el equipamiento debe soportar funcionalidades NGN. En la provincia existen equipos RSM, RSP, ESM, OLT y la central Alcatel, que no soportan funcionalidades NGN, por lo que los segmentos de red que involucran a los mismos, no podrán disfrutar de todas las ventajas de la solución; de ahí la necesidad de que la etapa de consolidación de red NGN, deberá incluir la sustitución progresiva de estos.

Una llamada de la PSTN actual de la central telefónica de la provincia de Granma con el mundo NGN (externo a esta provincia) se hará transitando por el UMG (utilizado como pasarela de medios); el tráfico será encaminado por el enrutador de borde ubicado en Bayamo, que viajará por el dorsal IP/MPLS hasta su destino. Por el contrario, una llamada territorial del nuevo segmento NGN a la PSTN y viceversa, se establece por medio del UMG y su enrutamiento se garantiza en el propio enrutador de borde situado en la provincia sin salir al dorsal IP/MPLS. Todo el control del establecimiento de la llamada, tarificación, entre otras acciones de supervisión de la red lo realizan los dos softswitch.

En la Figura 1 se ilustra la propuesta de migración de NGN para Granma. El proveedor de servicios a uti-

lizar es Huawei, ya que brinda una solución más completa y a un costo razonable a la situación económica actual de nuestro país. Se propone que en el local de la central digital donde está situada la Central TDM C&C08 se ubique el UMG 8900, utilizado como pasarela de la Central TDM C&C08 que permite la comunicación entre los clientes TDM e IP. Además, en este local se instalarán dos lanswitch S5328 de 24 puertos conectados en stack (paralelo), con el objetivo de agregar en este punto todos los servicios provenientes del MSAN IP que se propone ubicar en dicho local y prever las futuras ampliaciones del mismo, además de la migración de forma paulatina de los abonados conectados a la central digital C&C08 hacia NGN.

En el local del CMT se propone ubicar el CX 300 de Huawei, elemento que realizará todas las conmutaciones de la red a nivel provincial, tendrá funcionalidades de agregación para ambas redes, voz y datos, conectándose con dos enlaces G/E a los lanswitch S5328 y mediante F/E a la red SDH provincial, usando el equipo OSN 3500 ubicado en el CMT y con la red SDH nacional utilizando el OSN 7500 con dos enlaces G/E, respectivamente. El CX 300 cuenta con una velocidad de backplane de 48 Gbps, utiliza protocolo de enrutamiento OSPF, IS-IS y BGPv4. En esta propuesta de migración se mantendrán los MSAN TDM, las URA y otros equipos que se utilizan actualmente para brindar servicios a los municipios de la provincia, se pondrán un total de 8 MSAN IP, se incluye el del local de la central digital que hace posible dar servicio a 24 000 abonados nuevos en toda la provincia, aunque en esta solución solo se instalarán 9 408 servicios entre telefonía fija y datos.

La proyección futura debe ir hacia la consolidación de las redes NGN, por lo que de forma paulatina se deberá migrar los MSAN actuales con funcionalidad TDM hacia el mundo IP, eliminando la función que hoy realiza C&C08 para conectarlos directamente al enrutador CX 300, igualmente todos los sitios nuevos que se agreguen a la red serán ya con funcionalidades IP. En el caso de esta propuesta solo serán 8 sitios los que serán instalados, por tres razones fundamentales: cambio tecnológico, baja densidad telefónica y ampliación de la red, en la Tabla 1 se muestran los equipos a utilizar y su ubicación.

La teoría de Erlang es aplicable al servicio de telefonía básica, independientemente del soporte, medio o tecnología que se utilice para brindarlo; es el comportamiento de los usuarios el que determina su validez. Se aplica al servicio, no a la tecnología. Existen dos teorías: la de pérdidas (Erlang B) y la de colas (Erlang C). Por tanto, es aplicable al dimensionamiento de los recursos que le servirán de soporte en la NGN; en este caso la velocidad de transmisión VoIP requerida para cursar tráfico sobre este tipo de red.

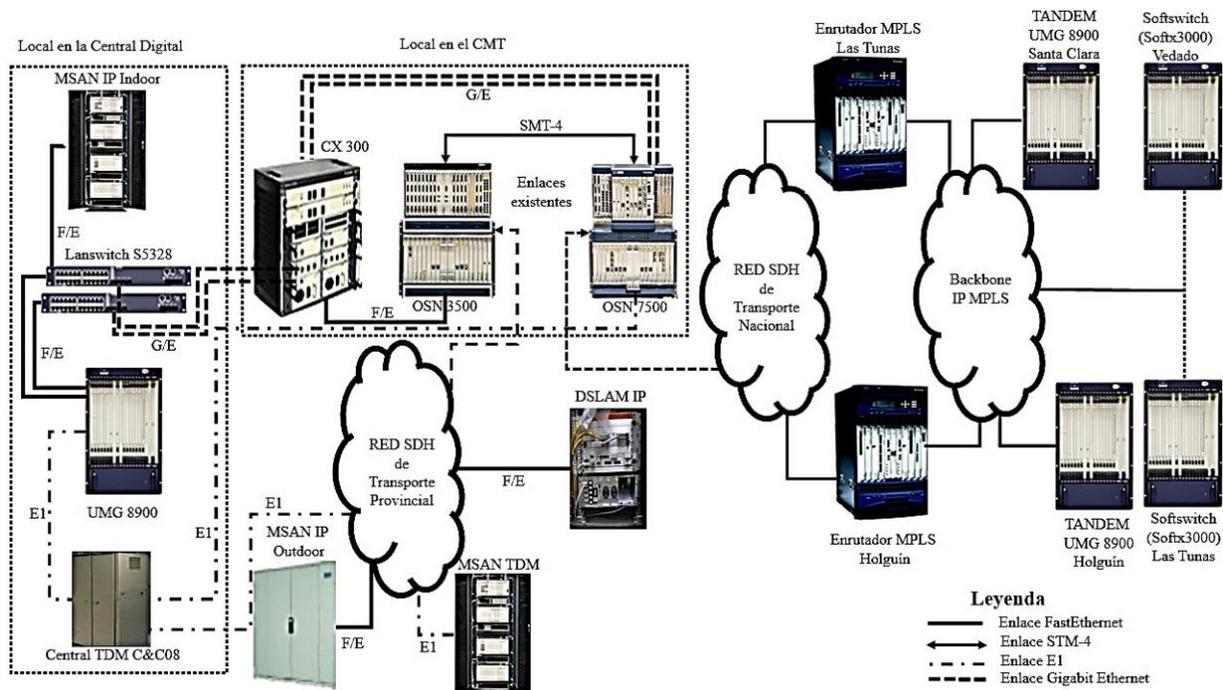


Figura 1. Propuesta de migración de NGN para Granma, proveedor Huawei.

En las redes tradicionales TDM, cuando se calcula la cantidad de circuitos necesarios para cursar un tráfico determinado con un por ciento de pérdida dado, indirectamente se está calculando velocidad de transmisión, porque cada circuito es un canal PCM con una velocidad de transmisión de 64 Kbps.

Tabla 1. Ubicación de los MSAN IP

Equipo	Lugar	Equipo de transmisión
MSAN IP (Interior)	Bayamo	Metro 1000
MSAN IP (Interior)	Cauto Cristo	Metro 1000
MSAN IP (Interior)	Río Cauto	Metro 1000
MSAN IP (Interior)	Niquero	Metro 1000
MSAN IP (Interior)	Manzanillo	OSN 3500
MSAN IP (Exterior)	Vázquez	OSN 500
MSAN IP (Exterior)	Camilo 1	OSN 500
MSAN IP (Exterior)	Camilo 2	OSN 500

Para el cálculo de la velocidad de transmisión de la voz hay que tener en cuenta que cada protocolo o capa cuando encapsula un paquete IP le añade sus encabezados para poder procesarlo y enrutarlo, lo que provoca que el paquete a transmitir tenga un tamaño en bit muy superior al Payload o carga útil de voz. Cada CODEC tiene una velocidad de transmisión de paquetes de voz predeterminada que debido al incremento del tamaño de los paquetes se traduce en un incremento de velocidad de transmisión requerida. Para transmitir la voz desde un MSAN IP a través de la red IP, se tienen que utilizar los siguientes protocolos: Protocolo de en-

lace Capa 2. IEEE 802.3, IP, UDP (User Datagram Protocol) y RTP (Real-time Transport Protocol) [19].

En la Tabla 2 se muestran los cálculos de las velocidades de transmisión realizados en [20], así como el número de líneas necesarias en cada una de las 8 localidades.

Tabla 2. Número de líneas y velocidades de transmisión necesarias

Sitios	N.º líneas	Voz (Mbps)	Datos (Mbps)	Voz + Datos (Mbps)
Bayamo	896	12	26	38
Cauto Cristo	864	12	22	34
Río Cauto	1216	15	34	49
Niquero	960	13	26	39
Manzanillo	896	12	26	38
Vázquez	960	13	26	39
Camilo I	960	13	26	39
Camilo II	960	13	26	39

3.1. Migración sitios Camilo I y II

El reparto Camilo Cienfuegos es una de las zonas más extensas de la cabecera provincial (Bayamo). Es una localidad de alta densidad de viviendas, y de baja densidad telefónica, con solo el 8,58 % de la demanda de pares telefónicos. La red actual está saturada con cables de baja capacidad, en comparación con la cantidad de viviendas existentes y la demanda de servicios telefónicos. El problema de la red de esta zona se debe a la saturación de las redes existentes en la provincia:

fija, móvil, radio. Además, en las URA de Bayamo no se dispone de más puertos, lo que trae consigo que:

- El 66,66 % de las viviendas demanda, al menos, un par telefónico por vivienda.
- El 41,67 % de las edificaciones son de 2 o más niveles.
- El restante 33,33 % demanda un par telefónico cada dos viviendas.
- La densidad telefónica del servicio básico es de solo 2,04 servicios por cada 100 habitantes.

En la Figura 2 se observa la estructura de la red Camilo Cienfuegos. Para la migración de esta zona se propone la utilización de dos MSAN IP Outdoor (Camilo Cienfuegos I y Camilo Cienfuegos II). Los MSAN IP emplearán la red SDH provincial como transporte de los paquetes IP. Se propone también la instalación de dos OSN 500 que se utilizarán como elementos de transmisión de la nueva estructura de red del sitio; los mismos constarán de una tarjeta EFS para los servicios de Ethernet, previendo las conexiones futuras de transmisión de datos asociadas al área de distribución de planta exterior. Los MSAN IP utilizarán, además, dos tarjetas de control de banda estrecha (PVM) y dos de banda ancha (IPMD).

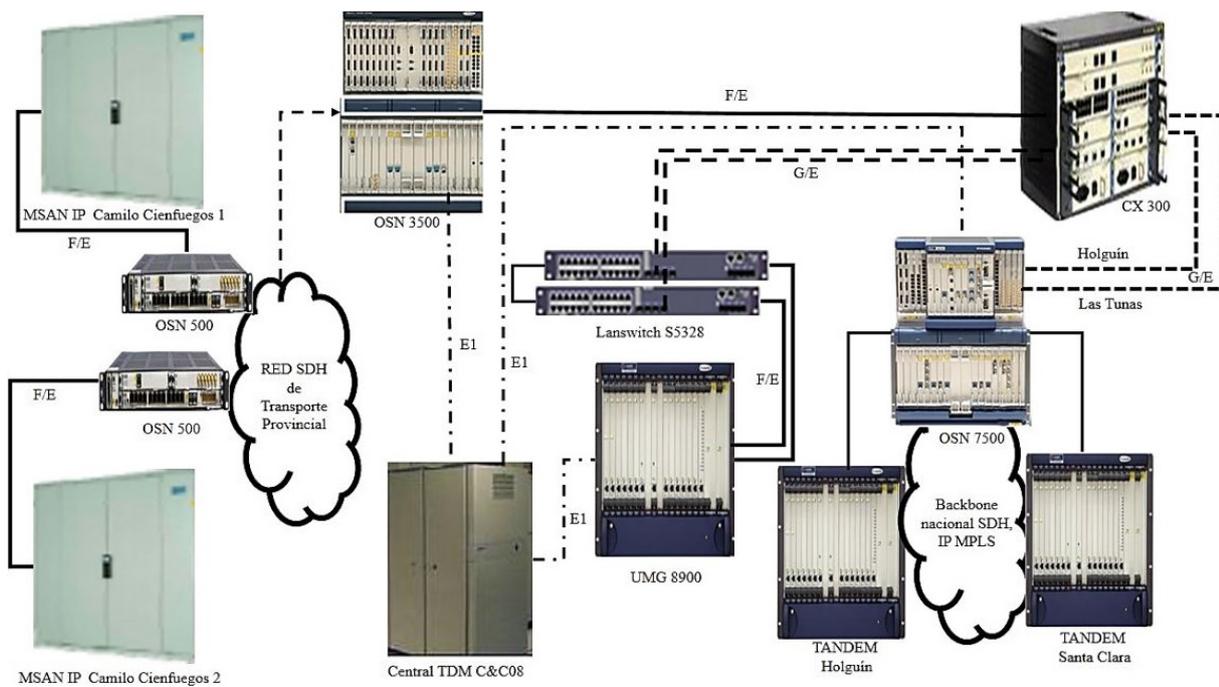


Figura 2. Propuesta de red del sitio Camilo Cienfuegos I y II.

3.2. Migración sitios Bayamo

El sitio Bayamo posee una central TDM C&C08 que presenta 51 520 líneas, de las cuales 9040 se encuentran instaladas en el propio centro telefónico distribuidos en 3 gabinetes RSP de las cuales 8942 están brindando servicios. Estos además de ser catalogados de tecnología obsoleta están a máxima capacidad.

Como se muestra en la Figura 3 el MSAN IP de Bayamo se conectará directamente a los lanswitch

S5328 y estos al CX 300, siendo este el dispositivo encargado de realizar la conmutación hacia el destino final.

El MSAN de Bayamo poseerá dos tarjetas de control para servicios de banda estrecha (PVM) y dos para servicios de banda ancha (IPMD). Los cuatros tarjetas serán cableadas a los lanswitch S5328 que concentrarán el tráfico de la URA IP. Los softswitch del Vedado y Las Tunas realizarán el control del MSAN IP mediante el protocolo H.248.

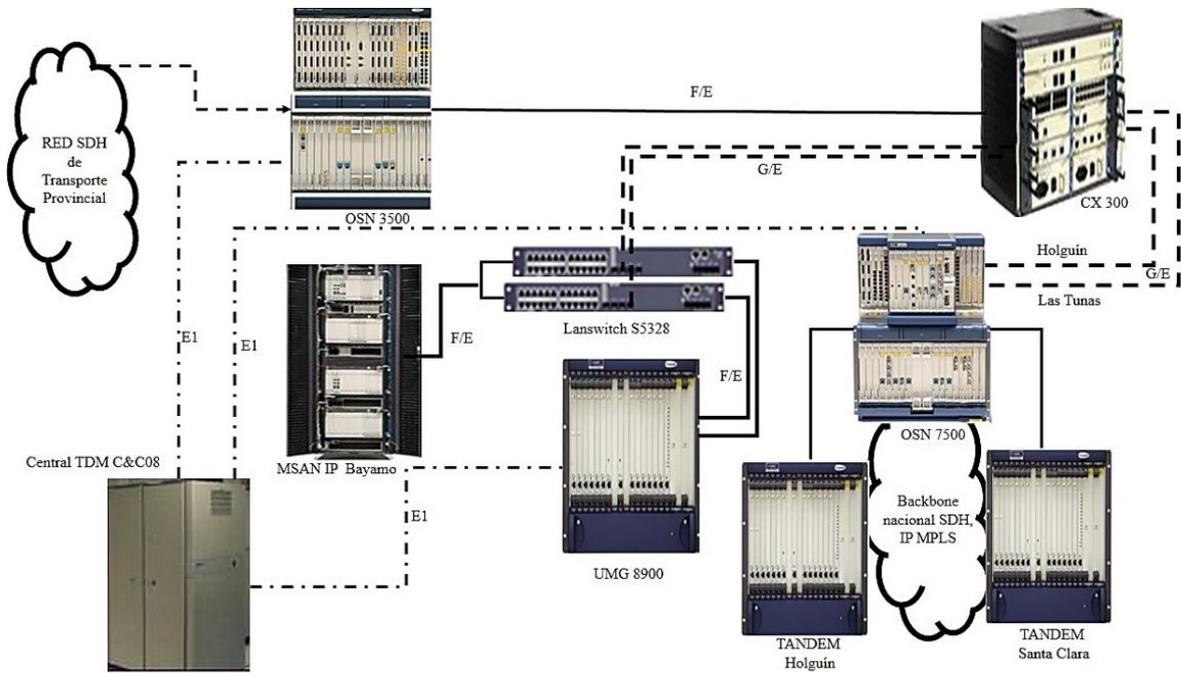


Figura 3. Propuesta de red del sitio Bayamo.

3.3. Migración sitios Río Cauto

El municipio de Río Cauto actualmente posee una URA DLC de la central TDM C&C08 con un total de 800 líneas, de las cuales 788 están en servicio, la misma se encuentra catalogada como una tecnología obsoleta.

Para dar solución al problema existente en este municipio, es necesario realizar un cambio total de la tecnología (DLC) existente en el sitio. Se logrará a

través de la instalación de un MSAN IP Indoor del tipo F02A HABA cableado posterior del proveedor de servicios Huawei, que será controlado por los softswitch del Vedado y Las Tunas. El MSAN IP poseerá un lanswitch S3328 para recibir el cableado de las interfaces FE de los puertos de las tarjetas de control en banda estrecha (PVM) y banda ancha (IPMD). El equipo de transmisión que se utilizará es el Metro 1000 existente en el propio municipio, como se muestra en la Figura 4.

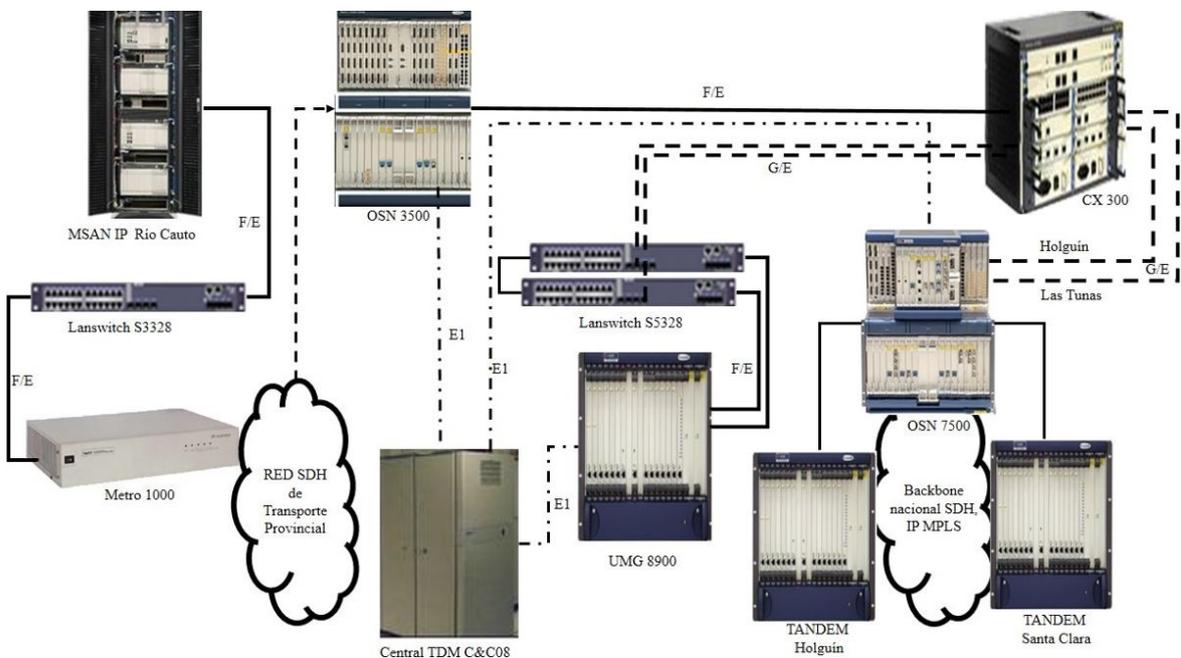


Figura 4. Propuesta de red del sitio Río Cauto.

3.4. Migración sitios Cauto Cristo

Cauto Cristo posee una central de pequeña capacidad (CDPC) A4300 enlazada a la central TDM C&C08, la cual posee 704 líneas instaladas, de las cuales 666 están en servicio en un equipamiento que se encuentra catalogado como tecnología obsoleta. Por tanto, para hacer un cambio tecnológico de la CDPC se instalará un MSAN IP del proveedor Huawei.

En la Figura 5 se muestra la estructura de la red de Cauto Cristo, donde el MSAN de cableado posterior tendrá un lanswitch S3328 para recibir el cableado de las interfaces FE de los puertos de las tarjetas de

control de banda ancha (IPMD) y estrecha (PVM). El MSAN IP constará con 864 líneas POTS, 160 ADSL2+ y 16 líneas SHDSL.

Las líneas POTS equipadas en las tarjetas H60D00VASL01 serán de 64 abonados, mientras que las líneas ADSL2+ equipadas en las tarjetas H60DCSRB6101 (que en este caso trabaja como COMBO porque alberga a abonados POTS) serán de 32 abonados. Las líneas SHDSL (H60-SHLB) poseen 16 puertos de servicios. Se propone como elemento de transmisión para el sitio un Metro 1000, que se utilizará para transitar por la red SDH de la provincia.

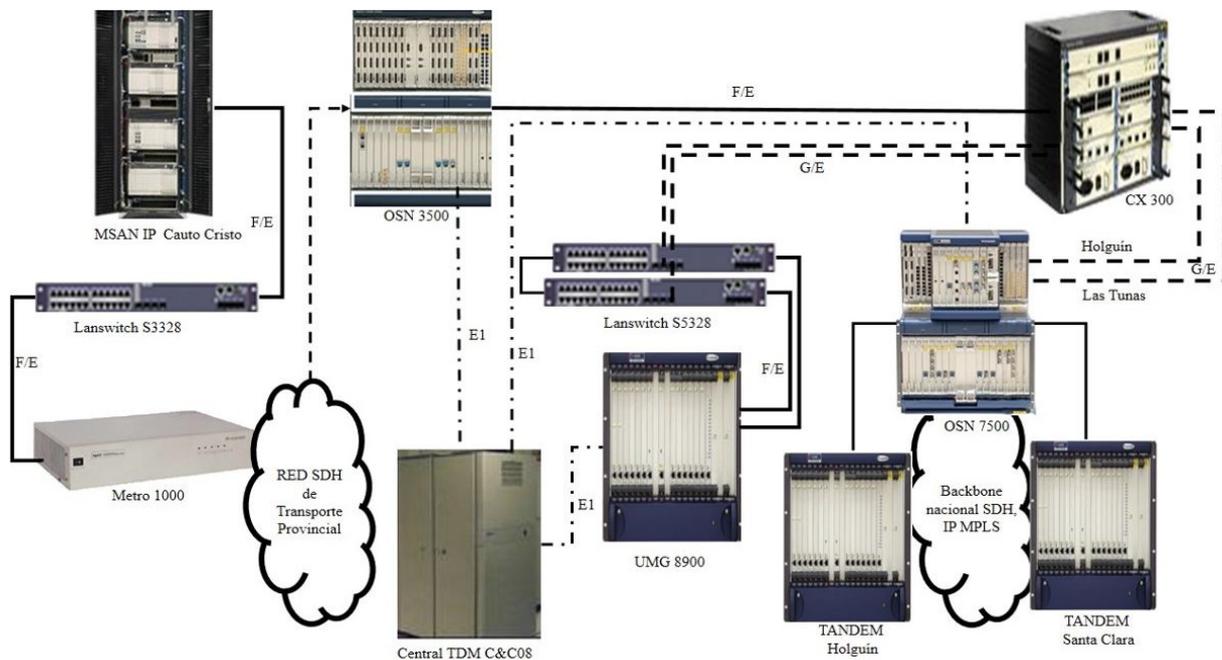


Figura 5. Propuesta de red del sitio Cauto Cristo.

3.5. Migración sitios Manzanillo

El municipio de Manzanillo posee una URA de la central TDM C&C08 que presenta 5776 líneas, de las cuales 5447 están en servicios distribuidos en 4 gabinetes de un ESM, que se encuentra catalogado como tecnología obsoleta. Para hacer un incremento de líneas en esta ciudad, se propone instalar un MSAN IP de tipo F02A HABA de cableado posterior del fabricante Huawei que será insertado en la solución de la NGN de la provincia. El mismo será controlado por los softswitch del Vedado y Las Tunas mediante el protocolo H.248.

Para este incremento se ha concebido la adquisición de un MSAN IP UA5000. El MSAN poseerá un lan-

switch S3328 para recibir el cableado de las interfaces FE de los puertos de las tarjetas de control de banda ancha (IPMD) y estrecha (PVM), con 896 POTS, 192 ADSL2+ y 16 líneas SHDSL.

Las líneas POTS equipadas en las tarjetas H60D00VASL01 serán de 64 abonados, mientras que las líneas ADSL2+ equipadas en las tarjetas H60DCSRB6101 (que en este trabajo son denominadas COMBO, pues tienen la posibilidad de albergar a abonados POTS) serán de 32 abonados. Las líneas SHDSL (H60-SHLB) poseerán 16 puertos de servicios. El equipo utilizado para la transmisión será el OSN 3500 en servicio, el cual posibilita el tráfico por la red SDH provincial como se muestra en la Figura 6.

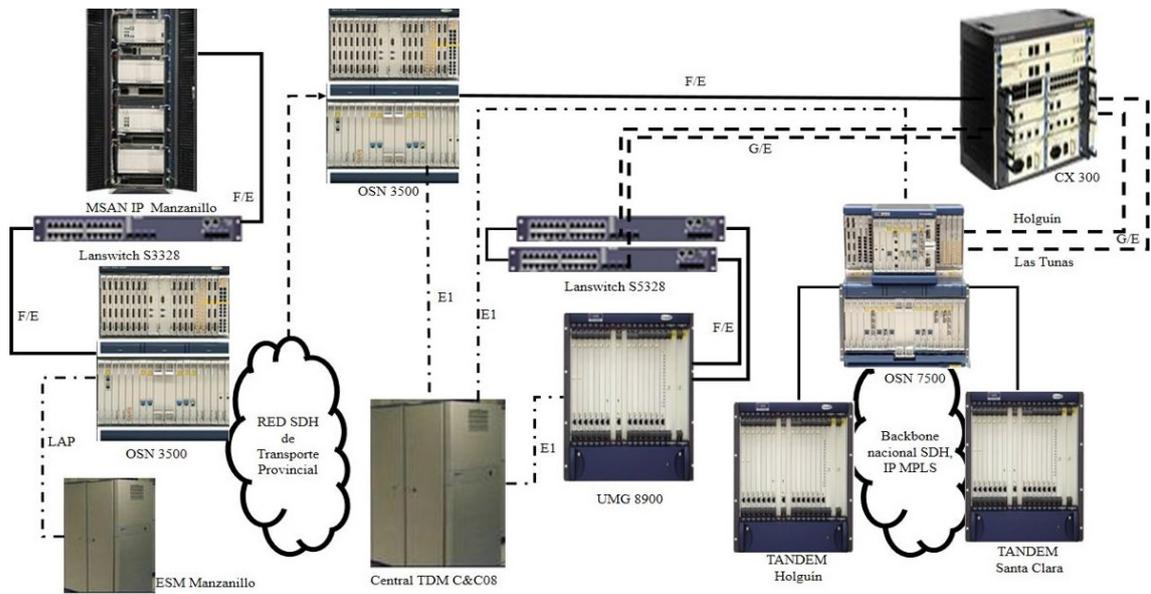


Figura 6. Propuesta de red del sitio Manzanillo.

3.6. Migración sitios Vázquez

El reparto Vázquez del municipio de Manzanillo es uno de los repartos más extensos de este municipio. Es una zona de alta densidad de viviendas, y de baja densidad telefónica. Para solucionar la situación descrita anteriormente, en esta zona se ubicará un MSAN IP del tipo F01D1000 con 960 líneas POTS, 192 ADSL2+ (combos) y 16 SHDSL (datos puros), equipado para ofrecer servicios VoIP. El MSAN utilizará tarjetas de control de banda estrecha (PVM) y ancha (IPMD).

En la Figura 7 se muestra la estructura de la red del sitio Vázquez. El MSAN IP empleará la red SDH

provincial como transporte de los paquetes IP, y se propone como elemento de transmisión de esta zona un OSN 500; el mismo constará de una tarjeta EFS para los servicios de Ethernet, previendo las conexiones futuras de transmisión de datos asociada al área de distribución de la planta exterior. El tráfico telefónico y de datos puede ser del mundo IP al TDM y entre mundos IP, municipal, provincial y nacional. La comunicación de este segmento de red con los abonados provinciales y nacionales transitará por la red SDH provincial, de la misma forma que el sitio Camilo Cienfuegos, utilizando como elemento de transmisión un OSN 500.

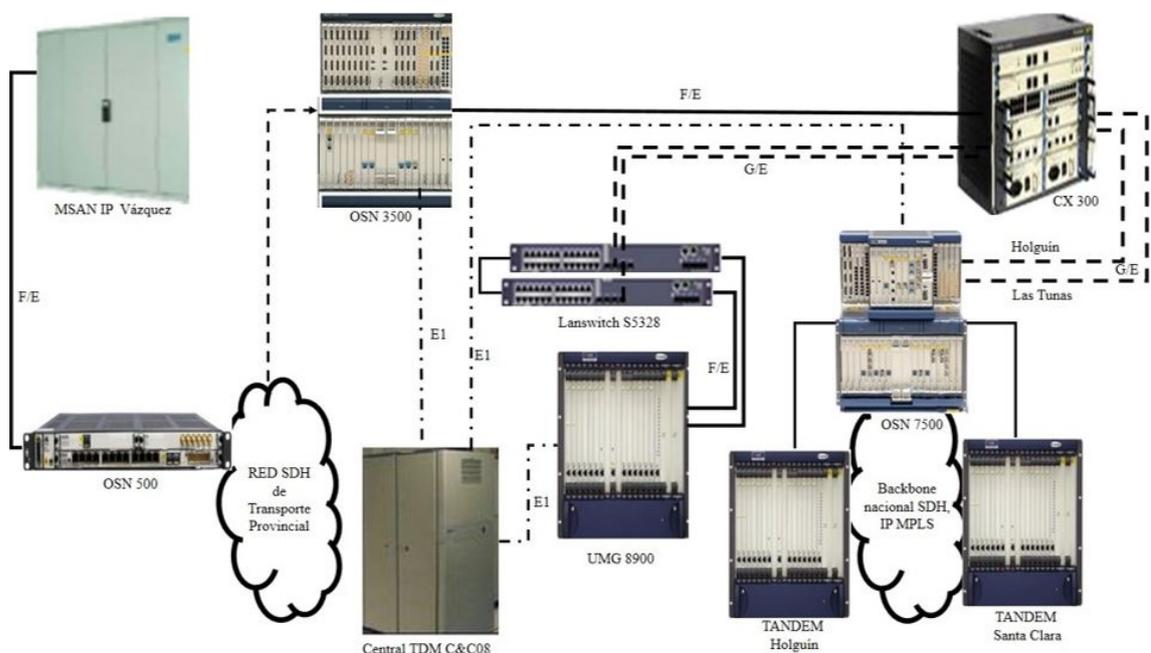


Figura 7. Propuesta de red del sitio Vázquez.

- de telecomunicaciones de América Latina, 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/oGBt4P>
- [4] S. Jiménez and J. Lira, *Desarrollo de las Telecomunicaciones: Una Fuente para el Progreso*. Libertad y desarrollo, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/5HWYgT>
- [5] M. Rodríguez, “Crecimiento y expansión de los servicios de telecomunicaciones en argentina durante la posconvertibilidad ¿concentración económica con descentralización productiva?” *Galega de Economía*, vol. 25, no. 1, pp. 121–136, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/o6QmmQ>
- [6] A. L. Mellado Ochoa, “La infraestructura de telecomunicaciones y el desarrollo económico de los países,” Master’s thesis, Universidad del Pacífico, Perú, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/82nRgN>
- [7] ENS, *El sector de las telecomunicaciones: Entramado de relaciones laborales con los gigantes colombianos*. ENS. Escuela Nacional Sindical, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/dDpqmo>
- [8] M. de Telecomunicaciones, *Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información del Ecuador 2016-2021*. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, Ecuador, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/kJwWaa>
- [9] R. Verdecia Peña and M. Paneque Mojena, “Aula especializada para el fortalecimiento de la preparación integral de los trabajadores de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba,” *Didascia: Didáctica y Educación*, vol. 8, no. 1, pp. 131–142, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/pDoKg7>
- [10] R. M. Hernandez, “Impacto de las tic en la educación: Retos y perspectivas,” *Propósitos y Representaciones*, vol. 5, no. 1, pp. 325–347, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.20511/pyr2017.v5n1.149>
- [11] L. Y. Avella Martinez and P. P. Parra Ruiz, *Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICS) en el sector salud*. Especialización en Administración en Salud Pública y Servicios de Salud, Universidad Nacional de Colombia., 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/8e8eTQ>
- [12] G. E. Cano Pita, “Las tic en las empresas: evolución de la tecnología y cambio estructural en las organizaciones,” *Dominio de las Ciencias*, vol. 4, no. 1, pp. 499–510, 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/JFPNRs>
- [13] S. K. Mohapatra, “Integrated planning for next generation networks,” in *2009 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management-Workshops*, June 2009, pp. 205–210. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INMW.2009.5195961>
- [14] O. A. Gusmán Obregón, Y. A. Marín Muro, and C. Rodríguez López, *Red de Próxima Generación. Una alternativa para la implementación de nuevos servicios en la red de telecomunicaciones de Cuba*. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba., 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/aXtjBV>
- [15] A. B. Johnston, *SIP: Understanding the Session Initiation Protocol*. Artech House, 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/jCCYgk>
- [16] ETECSA, *U-SYS NGN*. Empresa de telecomunicaciones de CUBA S. A., 2006.
- [17] HUAWEI, “U-sys softx3000 softswitch system,” Huawei Technologies Proprietary, Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/xSp4WY>
- [18] Huawei, “System description of umg5900,” Huawei Technologies, Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/HXAXGU>
- [19] O. Gonzalez Soto, *Concepto y arquitectura de las Redes NGN*. International Telecommunications Union (ITU), 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/RZ4sD7>
- [20] R. Verdecia Peña, *Propuesta para la migración hacia NGN en la provincia de Granma*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad de Oriente Sede ISPJAM, Santiago de Cuba, Cuba, 2014.



ANÁLISIS DEL ELECTROLITO DEL ACUMULADOR AUTOMOTRIZ A DIFERENTES TEMPERATURAS EN CONDICIÓN DE ENCENDIDO

ANALYSIS OF THE ELECTROLYTE OF AN AUTOMOTIVE ACCUMULATOR FOR DIFFERENT TEMPERATURES IN STARTING CONDITION

Johnny Pancha^{1,*}, Vicente Rojas¹, Vicente Romero¹, Jorge Nejer¹

Resumen

Una batería automotriz del tipo plomo ácido es un elemento que genera una fuerza electromotriz capaz de abastecer de energía a todo el sistema eléctrico del vehículo. En el presente estudio se analiza el comportamiento de la densidad específica del electrolito durante la condición de arranque de un motor térmico; además, se considera como una variable, el gradiente de temperatura de funcionamiento que puede estar expuesto una batería automotriz. Obteniendo resultados de una variación inversamente proporcional del comportamiento de la temperatura del electrolito y su densidad en las celdas del acumulador durante la condición de arranque. Se concluye que las condiciones externas como la temperatura pueden afectar directamente a la densidad y las condiciones eléctricas de un acumulador, así como identificar el comportamiento de estas durante el funcionamiento en un vehículo.

Palabras clave: arranque, batería, electrolito, temperatura.

Abstract

An automotive battery of the acid lead type is an element that generates an electromotive force capable of supplying energy to the entire electrical system of the vehicle. In this investigation, the behavior of the specific density of the electrolyte during the start-up condition of a heat engine is analyzed; the operating temperature gradient at which the battery can be exposed is also considered as a variable. According to the results, the electrolyte temperature is inversely proportional to its density in the cells of the accumulator during the start-up condition. It is concluded that external conditions, such as the temperature, can directly affect the density and electrical conditions of an accumulator, and can identify the behavior of these during the operation in a vehicle.

Keywords: Starting, Battery, Lead acid, Temperature.

^{1,*}Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: johnny.pancha@esPOCH.edu.ec. <http://orcid.org/0000-0001-7320-2154>, <http://orcid.org/0000-0001-5658-3055>, <http://orcid.org/0000-0003-2317-7071>, <http://orcid.org/0000-0002-5744-2585>.

Recibido: 15-11-2018, aprobado tras revisión: 17-12-2018

Forma sugerida de citación: Pancha, J.; Rojas, V.; Romero, V. y Nejer, J. (2019). «Análisis del electrolito del acumulador automotriz a diferentes temperaturas en condición de encendido». INGENIUS. N.º 21, (enero-junio). pp. 88-94. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.09>.

1. Introducción

La batería automotriz ha sido diseñada para trabajar cuando un motor de combustión interna necesita encenderse mediante el uso de un motor de arranque y el acumulador automotriz; debe tener la capacidad para abastecer de energía durante esta condición para generar los primeros giros del motor. La condición de arranque es el comportamiento eléctrico donde la batería automotriz tiene el más alto desempeño y la correlación entre la densidad específica del electrolito del acumulador en función de la temperatura [1]. La densidad específica se relaciona con el estado de carga de una batería y la interacción con el material activo, la influencia de la temperatura se relaciona con el voltaje y la intensidad de corriente que esta puede entregar [2]. La variación en el gradiente de temperatura utilizado y la condición de arranque enfoca resultados que pueden relacionarse con los obtenidos en el estudio de la gasificación del electrolito de un acumulador durante su funcionamiento de carga y la temperatura expuesta [3]; la cual genera datos adicionales del comportamiento en una condición tan común durante el funcionamiento de un automotor. Es muy importante estudiar el efecto de la temperatura en el funcionamiento de las placas negativas y positivas, durante el proceso de carga, descarga, funcionamiento de arranque y condiciones externas como la temperatura ya que afectan su vida útil y, además, al estar expuesta a un electrolito como es el ácido sulfúrico [1].

1.1. Batería automotriz

Elemento primordial del sistema eléctrico del vehículo, diseñado para abastecer de energía entre algunas condiciones eléctricas siendo la más primordial la capacidad de arranque para cumplir el objetivo esencial de encender el motor [4]. La capacidad de arranque es efectiva en un acumulador durante el tiempo de 10 segundos y abasteciendo del máximo amperaje posible que puede entregar su diseño interno durante la condición eléctrica que se produce cuando se generan los giros del motor. Esta prueba, denominada condición de arranque, se ha estandarizado a una temperatura ambiente 25 °C, mientras que la prueba realizada a 0 °C y -18 °C se denomina condición de arranque en frío [5].

1.2. Densidad específica

En 1860, Gaston Plante combinó un Pb / PbSO₄ con un electrodo de PbO₂ / PbSO₄ en una solución de ácido sulfúrico y obtuvo una fuente de energía electroquímica con gran fuerza electromotriz [4].

La temperatura es un factor importante que influye en la fuerza electromotriz de un acumulador, por lo que baterías automotrices expuestas a bajas temperaturas presentan problemas en su diseño interno

impidiendo que puedan desarrollar su trabajo con normalidad, característica de los vehículos en regiones frías [6]. Mientras que la exposición del acumulador en condiciones de altas temperaturas acelera el deterioro de los elementos internos y acelera la oxidación de las placas positivas.

La resistencia eléctrica específicamente (resistividad) del electrolito H₂SO₄, es uno de los parámetros básicos que determinan la resistencia interna y el poder en cada una de las celdas de una batería plomo ácido [7]. Cuando la resistencia interna de la celda es alta, una parte sustancial de la energía útil se consume dentro de la propia celda, es decir, la energía se pierde en forma de calor, cuando la corriente eléctrica fluye a través de la celda, depende de la concentración y temperatura del electrolito [7].

1.3. Temperatura

Se considera que el electrolito (H₂SO₄ + H₂O) tiene 1,280 g/cm³ de densidad, es decir, 1,280 veces más pesado que un volumen igual de agua pura mientras los dos líquidos están a la misma temperatura [8].

En el diagnóstico automotriz, la herramienta más útil y efectiva para conocer el estado de la densidad específica se denomina densímetro o hidrómetro [5]. Una densidad comprendida entre 1,290 g/cm³ y 1,270 g/cm³ indica que el acumulador está completamente cargado, mientras que una densidad comprendida entre 1,240 g/cm³ y 1,200 g/cm³ muestra que la carga del acumulador se ha reducido. Cuando la densidad específica obtenida en el densímetro es inferior a 1,150 g/cm³ se considera que la batería se encuentra descargada. Estos valores se refieren a una temperatura del electrolito comprendida entre 20 °C a 25 °C [5]. Por lo tanto, se debe aplicar un ajuste por cada 5 grados de variación de la temperatura del electrolito sobre 25 °C supone una corrección de la densidad relativa en 0,0035 unidades [5].

1.4. Condición de arranque

Durante la condición de funcionamiento de un motor térmico, el dispositivo fundamental es el motor de arranque porque es el encargado de generar los primeros giros del motor para que pueda encenderse [5]. En el sistema eléctrico se genera una condición particular del comportamiento de la tensión cuando el motor inicia el giro, lo que se puede observar en la Figura 1. La norma ISO16750-2 determina que la condición de arranque se estructura por la variación de tensión en valores que oscilan en relación del tiempo, que la norma estandariza en tiempos entre 3 a 10 segundos; tiempo en el cual existe alta demanda de intensidad de arranque lo que relaciona que la batería vaya descargándose por el trabajo realizado y esto se refleja en la densidad específica del electrolito [9].

La tensión del sistema eléctrico del vehículo decrece momentáneamente durante el arranque del motor. Este valor de tensión depende del estado de la batería. Los valores pueden bajar a distintos niveles entre 10,5 y 10,9 voltios cuando el acumulador se encuentra en buen estado [5].

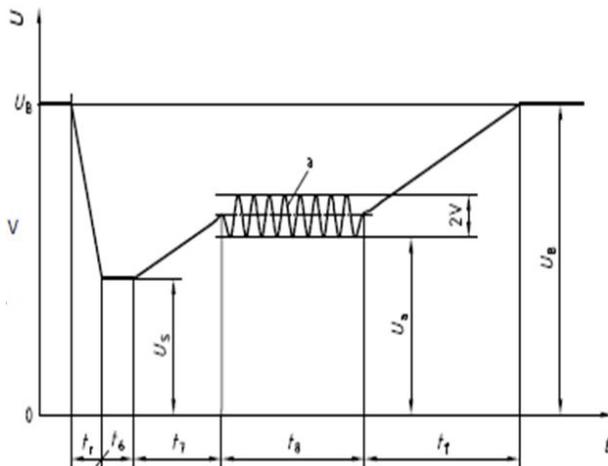


Figura 1. Comportamiento de la tensión de circuito eléctrico durante el arranque del motor térmico [4].

La temperatura es determinante en el desempeño del acumulador por lo que esta es mayor en altas temperaturas con relación a la capacidad de arranque en frío [9]. La resistencia eléctrica específica (resistividad) del electrolito H_2SO_4 es uno de los parámetros básicos que determina la resistencia interna y el poder de una célula de plomo ácido.

En un acumulador plomo-ácido, el sulfato es un sistema cerrado que se puede encontrar en las placas o en el electrolito según el estado de carga o la condición de funcionamiento. Si la batería está completamente cargada, entonces el sulfato está en el electrolito; mientras la batería está descargada, el sulfato está en las placas. El resultado final que presenta la densidad específica es una imagen que se relaciona con el voltaje y por lo tanto del estado de carga [9].

El objetivo de este análisis es conocer la relación del comportamiento de la densidad específica del electrolito de un acumulador automotriz durante la condición de arranque, generando una variación de la temperatura ambiente a la que está expuesta la batería. Por lo general el análisis de la densidad específica del electrolito se lo realiza para conocer el estado de carga, pero se busca analizar su incidencia cuando se somete al cambio ambiental de temperatura durante el proceso de almacenamiento y confirmar el cambio estructural en la densidad y su relación con la tensión e intensidad que ofrece la batería [10].

El estudio busca identificar el comportamiento de la densidad específica de la batería durante la condición de arranque, para conseguir indicios que puedan

dirigir este análisis hacia elementos iniciales de investigación y futuras mejoras con relación al diseño de baterías automotrices. No existen estudios relacionados sobre el comportamiento de la densidad específica durante el arranque en baterías plomo ácido por lo que se desea obtener valores con base en la variación de temperatura.

2. Materiales y métodos

La investigación realizada basa su estudio en un método experimental el cual comprende el análisis del comportamiento de la densidad específica de una batería automotriz durante la condición de arranque bajo diferentes condiciones ambientales de temperatura. Para esto se han realizado mediciones de la densidad específica en las 6 celdas que conforman una batería automotriz en condiciones óptimas de funcionamiento, cuya de tensión nominal es de 12 voltios.

El proceso aplicado que se realiza es para determinar de manera práctica el estado de una batería ante el arranque de un motor. Para comenzar el estudio se obtiene el valor de la densidad específica de cada una de las celdas para obtener su valor condición de reposo inicial; se genera el arranque del motor para así comprobar la condición de estabilidad del electrolito para lo que se repite dicha prueba 6 veces continuas sin llegar a encenderlo y se procede a registrar el valor de la densidad específica de cada celda al final de dichas pruebas. Es importante mencionar que se registra la temperatura del electrolito antes y después de la prueba para posteriormente aplicar el ajuste necesario de la densidad específica en relación con la temperatura de transición.

3. Resultados y discusión

3.1. Condición de temperatura alta

La temperatura externa de la batería se incrementa progresivamente para lo que se utiliza un calefactor térmico simulando temperatura ambiente. Se procede a registrar el valor de densidad específica de cada una de las celdas de la batería. En la Tabla 1 se observa el registro de los datos obtenidos a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y de los valores de ajuste con base al cálculo en función de la temperatura [5].

Los valores de ajuste de la densidad se realizan con base al porcentaje de pérdida y dilatación, pero durante el proceso se realiza el análisis con los valores ajustados y los obtenidos en cada prueba y medida realizada.

En la Figura 2 se aprecia el comportamiento de la densidad sobre la base de la estabilidad de temperatura a $55\text{ }^\circ\text{C}$; que indica un cambio grande en el primer bloque de celdas, pero una mayor estabilidad sobre

todo en las celdas centrales, y con una estabilidad más alta en el grupo de celdas cercanas al borne negativo.

Tabla 1. Densidad y temperatura antes del arranque

Celda	Temperatura ambiente °C	Temperatura caja de batería °C	Temperatura electrolito °C	Densidad específica g/cm ³	Tensión de batería durante la prueba V.	Densidad específica con ajuste g/cm ³
1	55	44	21,7	1,2	11,62	1,198
2	55	44	19,3	1,19	11,67	1,186
3	55	44	19,3	1,2	11,57	1,196
4	55	44	19,3	1,2	11,57	1,196
5	55	44	19,4	1,175	11,6	1,171
6	55	44	20,5	1,2	11,57	1,197

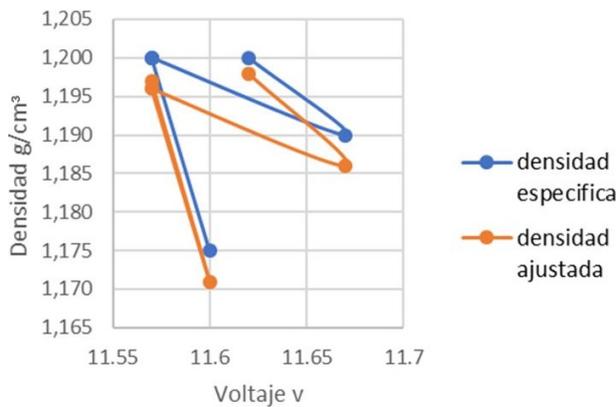


Figura 2. Gráfica de comportamiento de la densidad antes de someter al arranque a 55 °C.

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos después de realizar el proceso de arranque continuo para ver la condición de estabilidad del acumulador y de los valores de ajuste con base al cálculo en función de la temperatura [5].

Tabla 2. Densidad y temperatura antes del arranque

Celda	Temperatura ambiente °C	Temperatura caja de batería °C	Temperatura electrolito °C	Densidad específica g/cm ³	Tensión de batería durante la prueba V.	Densidad específica con ajuste g/cm ³
1	55	44	20	1,190	11,62	1,187
2	55	44	18,9	1,180	11,67	1,176
3	55	44	19	1,205	11,57	1,201
4	55	44	18,6	1,210	11,57	1,206
5	55	44	19,9	1,180	11,6	1,176
6	55	44	22,1	1,175	11,57	1,173

En la Figura 3 se aprecia el comportamiento de la densidad sobre la base de la estabilidad de temperatura de 55 °C, manteniendo estable la tensión de

la batería al momento de generar el proceso de consumo en arranque. Dando como resultado un cambio notable en el primer bloque de celdas, aunque su estabilidad se ve estable en las celdas centrales, pero generando un cambio notorio en las celdas cercanas al borne negativo.

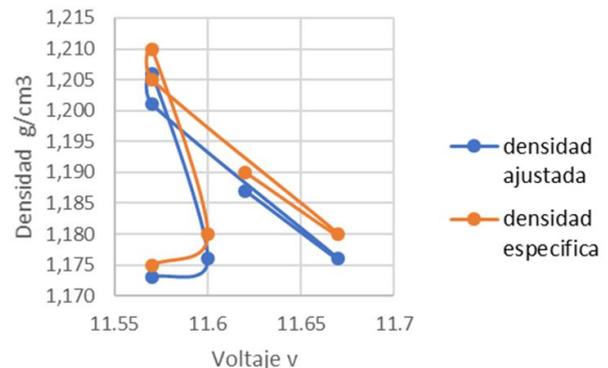


Figura 3. Gráfica de comportamiento de la densidad luego de someter al arranque a 55 °C.

3.2. Condición de temperatura baja

Para el registro de los datos en condiciones de temperatura baja, la cual se consigue encerrando a la batería en una cápsula de hielo seco hasta bajar su temperatura hasta el valor indicado; las celdas se someten a un cambio de temperatura inferior a la prueba anterior, logrando estabilizarla en una temperatura de 1 °C. En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos y de los valores de ajuste con base al cálculo en función de la temperatura [5].

Tabla 3. Densidad y temperatura antes del arranque

Celda	Temperatura ambiente °C	Temperatura caja de batería °C	Temperatura electrolito °C	Densidad específica g/cm ³	Tensión de batería durante la prueba V.	Densidad específica con ajuste g/cm ³
1	-2	1,4	6,4	1,250	11,17	1,231
2	-2	1,4	7,7	1,245	11,24	1,226
3	-2	1,4	8,3	1,250	11,24	1,231
4	-2	1,4	8,9	1,250	11,11	1,231
5	-2	1,4	9	1,245	11,2	1,226
6	-2	1,4	9,3	1,225	11,23	1,206

En la Figura 4 se observa el comportamiento de la densidad sobre la base de la estabilidad de temperatura de -2 °C: el comportamiento del electrolito a temperaturas bajas es más estable con respecto al de temperaturas altas.

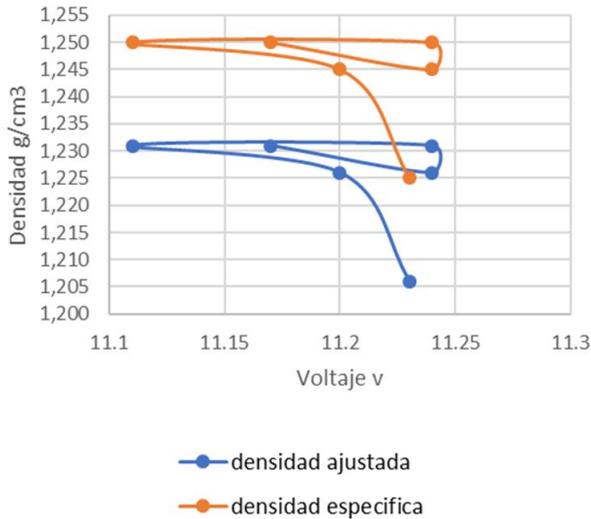


Figura 4. Gráfica de comportamiento de la densidad antes de someter al arranque a -2 °C.

En la Tabla 4 se muestra los resultados obtenidos después de realizar el proceso de arranque continuo para ver la condición de estabilidad del acumulador y de los valores de ajuste con base al cálculo en función de la temperatura [5].

Tabla 4. Densidad y temperatura antes del arranque

Celda	Temperatura ambiente °C	Temperatura caja de batería °C	Temperatura electrolito °C	Densidad específica g/cm ³	Tensión de batería durante la prueba V.	Densidad específica con ajuste g/cm ³
1	-2	1,4	6,4	1,230	12,46	1,211
2	-2	1,4	7,7	1,215	12,28	1,196
3	-2	1,4	8,3	1,250	11,43	1,231
4	-2	1,4	8,9	1,275	11,27	1,256
5	-2	1,4	9	1,250	11,31	1,231
6	-2	1,4	9,3	1,265	11,3	1,246

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la densidad sobre la base de la estabilidad de temperatura de -2°C, luego del proceso de arranque, cuyos valores de caída de densidad electrolítica y caída de tensión son considerables más aún en el grupo de celdas del borne positivo, indicando una minoría en la reacción y un esfuerzo en el proceso de descarga de esta durante dicha fase de prueba.

3.3. Condición de Temperatura ambiente

Con el proceso establecido en los casos anteriores, se obtienen los datos a temperatura ambiente de 27 °C. En la Tabla 5 se observan los valores de densidad específica y temperatura obtenidos con valor de ajuste [5].

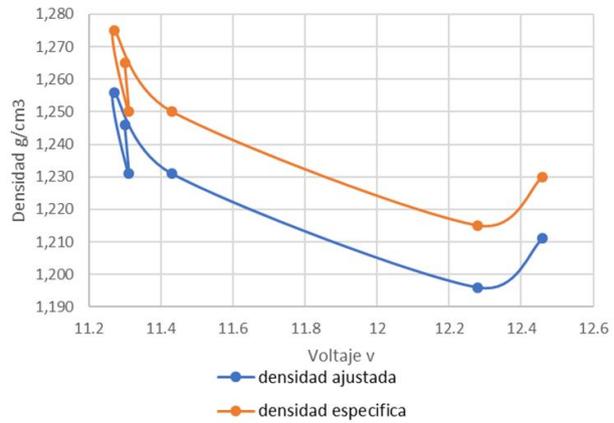


Figura 5. Gráfica de comportamiento de la densidad después de someter al arranque a -2 °C.

Tabla 5. Densidad y temperatura antes del arranque

Celda	Temperatura ambiente °C	Temperatura caja de batería °C	Temperatura electrolito °C	Densidad específica g/cm ³	Tensión de batería durante la prueba V.	Densidad específica con ajuste g/cm ³
1	20	27,2	14,06	1,200	11,17	1,197
2	20	27,2	14,11	1,190	11,24	1,187
3	20	27,2	14,49	1,200	11,24	1,197
4	20	27,2	14,73	1,200	11,11	1,197
5	20	27,2	15,15	1,175	11,2	1,172
6	20	27,2	16,15	1,200	11,23	1,197

En la Figura 6 se observa el comportamiento de la densidad sobre la base de la estabilidad de temperatura de 20 °C, indicando una estabilidad constante de la tensión y densidad de la batería.

Además, se puede observar un comportamiento de flujo cíclico por parte de la densidad del electrolito, a más de una estabilidad en la tensión de la batería, la cual se mantiene estable sin importar la condición de arranque.

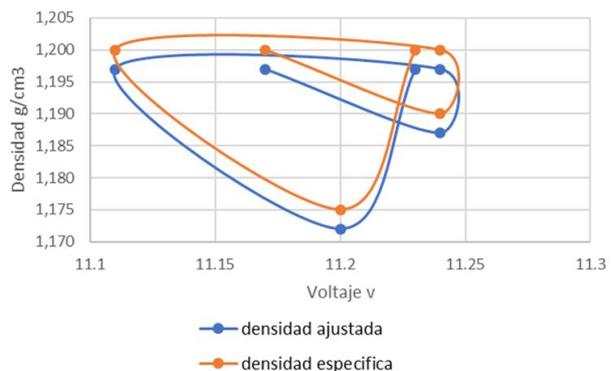


Figura 6. Gráfica de comportamiento de la densidad después de someter al arranque a 20 °C.

Los resultados se ven comparados en la prueba de arranque para obtener un análisis del comportamiento de la tensión y densidad de la batería bajo condiciones extremas lo que da un porcentaje de cambio de temperatura ambiente con respecto a condiciones altas de 0,3900 % y de 3,1375 % en temperaturas bajas indicando que la densidad del electrolito se ve afectada más por condiciones bajas, pero en tiempo estimado de arranque y estabilidad de tensión por las condiciones de temperatura alta como se puede apreciar en la Figura 7.

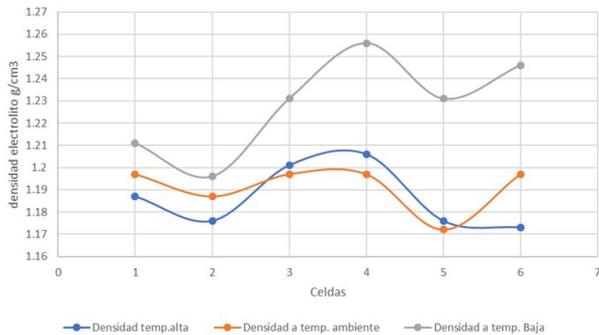


Figura 7. Gráfica de comparación de densidad a diferentes temperaturas.

4. Conclusiones

Las figuras representan el cambio de la densidad y tensión cuando se genera un cambio de temperatura y estabilización. Además, cada punto de la gráfica representa una celda y muestra el comportamiento del electrolito en las mismas.

La Figura 2 indica el valor de la tensión de la batería antes de generar el proceso de consumo en arranque. La estabilidad del acumulador en condiciones funcionamiento se comprueba tanto en voltaje y densidad.

La Figura 3 indica que el cambio de la tensión de la batería no es muy considerable al momento de generar el proceso de consumo en arranque, pero la alteración de la densidad del electrolito se ve alterada sobre todo en las celdas centrales.

Realizando un promedio del funcionamiento de las celdas, la tensión nominal sigue estando estable.

La Figura 4 indica el valor de la tensión de la batería antes de generar el proceso de consumo en arranque. Se observa una estabilidad en las condiciones de funcionamiento del acumulador en su densidad, mas no en su tensión.

La Figura 5 indica que el cambio de la tensión de la batería es muy considerable al momento de generar el proceso de consumo en arranque, pero la alteración de la densidad del electrolito tiene un cambio insignificante con respecto a las pruebas anteriores, sobre

todo en las celdas finales. Esto indica que la caída de estabilidad en las condiciones de funcionamiento del acumulador se ve más afectada cuando se procede a realizar el proceso de arranque a temperaturas bajas.

La Figura 6 indica que el cambio de la tensión de la batería no es muy considerable al momento de generar el proceso de consumo en arranque, pero la alteración de la densidad del electrolito se ve alterada de manera mínima en todas las celdas. La caída de estabilidad de las condiciones en el funcionamiento del acumulador se ve más afectadas cuando se procede a realizar el proceso de arranque a temperatura ambiente.

La Figura 7 nos presenta los resultados del comportamiento de la densidad a diferentes temperaturas y que al tener temperaturas más bajas se estabiliza más la densidad, pero pierde fuerza en la condición de arranque, mientras tanto en caliente se tiene más fuerza de arranque, pero la pérdida de tensión es mucho mayor.

El comportamiento de la densidad del electrolito es directamente proporcional al cambio de temperatura. Cuando aumenta la temperatura a valores más altos registrados en el funcionamiento del habitáculo del motor, la estabilidad se mantiene.

La densidad de la batería se ve alterada en su condición estable, sobre todo en las celdas centrales y finales al bajar la temperatura considerablemente, debido al recorrido de los electrones entre ellas provocando una caída brusca de tensión, pero su recuperación es mucho más rápida debido a que la densidad del electrolito se estabiliza.

Al aumentar la temperatura, la tensión se mantiene constante, pero se efectúa una variación extrema en la densidad del electrolito durante el arranque. Esto afecta al funcionamiento y durabilidad de la batería, pues la vida útil de esta se reduce considerablemente debido a la variabilidad de la densidad.

Al bajar la temperatura del electrolito a valores mínimos de funcionamiento real, genera un cambio extremo en la tensión de la batería, generando un mayor esfuerzo de los consumidores principales en el proceso de arranque, lo que provoca daños en los componentes del vehículo.

Al disminuir la temperatura del electrolito los valores la intensidad decae debido a la dificultad del desplazamiento de electrones, sobre esforzando a los consumidores eléctricos y electrónicos a su funcionalidad, lo que nos generaría una mejora al diseño de la estructura de las baterías.

Sobre la base de los resultados estudiados se considera que la temperatura del electrolito en diferentes condiciones ambientales genera un cambio en la funcionalidad, recomendando el uso de nuevos materiales y diseños para mejorar el comportamiento de la batería durante la condición de arranque.

Referencias

- [1] J. E. Torres, A. Sierra, D. Y. Peña, I. Uribe, and H. Estupiñan, “Velocidad de corrosión de una aleación base plomo en una solución de ácido sulfúrico a diferentes temperaturas,” *Materia (Rio de Janeiro)*, vol. 19, pp. 182–196, 06 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/tZqkW2>
- [2] A. Zolfaghari and G. Jerkiewicz, “Temperature-dependent research on pt(111) and pt(100) electrodes in aqueous h₂so₄,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 467, no. 1, pp. 177–185, 1999. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(99\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(99)00084-4)
- [3] C. A. Cadena and R. F. Farfán, “Sensor de gaseo para baterías de plomo - ácido: estudio preliminar,” *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente; Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 14, pp. 175–182, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/m9Ug3G>
- [4] D. Pavlov, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product*. Elsevier, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/WMEFcn>
- [5] J. M. Alonso, *Técnicas del automóvil equipo eléctrico*. Thomson Paraninfo, 2005. [Online]. Available: <https://goo.gl/4p4ymo>
- [6] D. Diemand, *Automotive Batteries at low temperatures*. US Army Corps of Engineers, 1991. [Online]. Available: <https://goo.gl/uWhBMV>
- [7] D. Pavlov, A. Kirchev, M. Stoycheva, and B. Monahov, “Influence of h₂so₄ concentration on the mechanism of the processes and on the electrochemical activity of the pb/pbo₂/pbso₄ electrode,” *Journal of Power Sources*, vol. 137, no. 2, pp. 288–308, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.06.006>
- [8] ISO, *Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Part 2: Electrical loads (ISO 160750-2)*, International Organization for Standardization Std. [Online]. Available: <https://goo.gl/nSXN3w>
- [9] Megger, *Battery testing guide*. Megger, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/5RopkA>
- [10] E. Rojas, “Análisis de la densidad específica del electrolito de un acumulador de energía automotriz plomo ácido a diferentes temperaturas,” *Sectei*, vol. 5, no. 1, pp. 80–84, 2018.

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 el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – Latindex, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto – DOAJ, en la Matriz de Información para el Análisis de Revistas – MIAR, en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico – REDIB y en repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-650X) y electrónica (e-ISSN: 1390-860X), en idioma español, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital

Object Identifier System). Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinarmente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista INGENIUS publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (*state-of-the-art*).

- **Investigaciones:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.
- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se

valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <<https://goo.gl/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> ,

<jjcalle@ups.edu.ec> ó

<mquinde@ups.edu.ec>.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente

en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o \LaTeX (.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para \LaTeX en: <<https://goo.gl/Mwv8IC>>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use enter al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use enter en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. **Título (español) / Title (inglés):**
Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español

y viceversa si está escrito en inglés.

2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Presentación (Cover Letter):** Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, con la confirmación de las autorías firmantes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <<https://goo.gl/XAc9a3>>.

3.1.2. Manuscrito

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español

y viceversa si está escrito en inglés.

2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatura más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.
6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es

necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.

7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.
11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto. Su número debe ser suficiente

para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

- [1] J. Riess, J. J. Abbas, “Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation”. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [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. Taobada. “Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico,” IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, "Computación paralela y entornos heterogéneos," Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100-1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices, U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, "A note on reflector arrays" [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas en arábigo y subtituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28

cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, de manera obligatoria dos archivos se deberán cargar, como archivo original el manuscrito en .pdf sin datos de autor y anonimizado, mientras que en archivos complementarios se deberá cargar la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito, adicionalmente se deberá cargar el manuscrito completo en .doc o .docx (archivo de Word), es decir con los datos del autor/es y su adscripción institucional; también se deben cargar en archivos independientes las

figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi.

Todos los autores deben ingresar la información requerida en la plataforma OJS y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC
- Debe estar en el formato de la revista INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

La comprobación antes descrita puede llevar hasta 4 semanas.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
 - Publicable
 - Publicable con cambios sugeridos
 - Publicable con cambios obligatorios
 - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1 de enero y el 1 de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Javier Herrán Gómez, sdb
Rector

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

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

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

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,
publicación semestral, N.º 21, enero/junio 2019
John Calle Sigüencia, Editor Responsable
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.



**ABYA
YALA** | UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
SALESIANA

