

20
19

Septiembre 5 y 6

CIISOL



CONGRESO INTERNACIONAL
DE INGENIERÍA CON
IMPACTO SOCIAL

Universidad Cooperativa de Colombia, sede Medellín
Grupo de Investigación TERMOMEC - Facultad de Ingeniería



Universidad Cooperativa
de Colombia





Universidad Cooperativa
de Colombia

Actas de Memorias Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social CIIISOL 2019

Fecha: 5 y 6 de septiembre del 2019
Lugar: Universidad Cooperativa de Colombia
Sede Medellín

ISSN Colección Actas: 2539-1925
doi: <https://doi.org/10.16925/ecam.02>

COMPILADOR

Francisco Javier Vélez Hoyos

COMITÉ EDITORIAL

Francisco Javier Vélez Hoyos
María Consuelo Moreno Orrego
Adriana Patricia Villegas Quiceno
César Alveiro Montoya Agudelo
Eder Alonso Acevedo Marín

COMITÉ ORGANIZADOR

Director académico
Francisco Javier Vélez Hoyos
Coordinación general
Adriana Patricia Villegas Quiceno
Coordinación de medios
Eder Alonso Acevedo Marín
Paolo Andrés Cantillo Largo
Coordinación de logística
Sindy Yurley Barbosa García
Apoyo a coordinación de logística
Diana Patricia Urrea Ramírez

COMITÉ ACADÉMICO

Adriana Patricia Villegas Quiceno (Ph.D.)
Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín
Eder Alonso Acevedo Marín (Ph.D.) (C)
Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín
Sindy Yurley Barbosa García (Esp.)
Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín
Angélica María Santis Navarro (Ph.D.)
Universidad Cooperativa de Colombia sede Bogotá
Francisco Javier Vélez Hoyos (Ph.D.) (C)
Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín

Jorge Mauricio Sepúlveda Castaño (Ph.D.) (C)
Corporación Universitaria Remington

Silvana Ruiz Moreno
Universidad de San Buenaventura

César Isaza (Ph.D.)
Universidad Pontificia Bolivariana

Karen Cacua (Ph.D.)
Instituto Tecnológico Metropolitano

Pedro Nel Alvarado Torres (Ph.D.)
Instituto Tecnológico Metropolitano

Sebastián Villegas (MSc.)
Universidad de Medellín

Mariana Peñuela (Ph.D.)
Universidad de Antioquia

Natalia Gómez (Ph.D.)
Universidad de Antioquia

Claudia Aldana (MSc.)
Universidad de Antioquia

Claudia Muñoz (Ph.D.) (C)
Universidad de Antioquia

Camilo Andrés Flórez (Ing.)
Universidad Santo Tomás

Jim Giraldo (MSc.)
Institución Universitaria Pascual Bravo

Óscar Alberto Castaño Gallego (MSc.)
Universidad Católica del Norte

Iván Reinaldo Sarmiento (Ph.D.)
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Diana Patricia Urrea Ramírez (MSc.)
Corporación Universitaria Remington

Carlos Augusto Portilla Cubillos (Esp.)
Universidad Católica Luis Amigó

William Dario Bonolly Zapata (MSc.)
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Raúl Gilberto Salazar Saldarriaga (MSc.)
Fundación Universitaria María Can

PROCESO EDITORIAL

Daniel Urquijo Molina
Coordinación
Carolina Ochoa
Corrección de estilo
Ivonne Carolina Cardozo
Diseño y diagramación



Cómo citar este documento

F. J. Vélez Hoyos (Comp.), *Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social CIIISOL*. Bogotá, Colombia: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.
doi: <https://doi.org/10.16925/ecam.02>

LÍNEAS TEMÁTICAS

1. Energía, agua y medio ambiente

En esta línea, se abordarán los proyectos de generación energética con fuentes tradicionales y alternativas, así como los estudios en el cuidado y la calidad del agua y el medio ambiente.

2. Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos

Se considerarán aquí los desarrollos en materiales novedosos y amigables con el ambiente, y los procesos de generación y transformación de recursos, productos e insumos a través del modelamiento y el diseño de procesos especializados.

3. Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)

Apunta a la revisión de las propuestas en administración de los recursos y medios tecnológicos, y a la implementación de tecnologías informáticas y de las comunicaciones con miras al establecimiento de ciudades y entornos más inteligentes.

4. Estructuras, vías y transporte

Donde se evidenciarán los estudios que buscan impactar los proyectos de desarrollo de la infraestructura civil a nivel de los territorios y las comunidades.

COMITÉ CIENTÍFICO

1. Energía, agua y medio ambiente

Ramón Fernando Colmenares Quintero (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Óscar Felipe Arbeláez Pérez (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Mario Fernando Castro (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Daniel Ricardo Delgado (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

César Isaza (Ph.D.)

Universidad Pontificia Bolivariana

Karen Cacua (Ph.D.)

Instituto Tecnológico Metropolitano

Pedro Nel Alvarado Torres (Ph.D.)

Instituto Tecnológico Metropolitano

Sebastián Villegas (MSc.)

Universidad de Medellín

Francisco Campillo Machado (MSc.)

Corporación Universitaria Remington

Jhon Fredy Narváez Valderrama (Ph.D.)

Corporación Universitaria Remington

Yuhan Arely Lennis (Ph.D.)

Institución Universitaria Pascual Bravo

Óscar Alberto Castaño Gallego (MSc.)

Universidad Católica del Norte

Juan Carlos Valdés Quintero (Ph.D.)

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

2. Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos

Denisse Serrano Palacios

Instituto Tecnológico de Sonora - México

Paolo Oliveri

Università degli studi di Genova - Italia

Daira Aragón Mena (Ph.D.)

U.S. Sugar Corporation, Florida, Estados Unidos

Angélica María Santis Navarro (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Paola Andrea Acevedo Pabón (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Diana Milena Caicedo Concha (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Javier Julián Ruiz Zapata (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Wildeman Zapata Builes (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Víctor Hugo Aristizábal Tique (Ph.D.) (C)

Universidad Cooperativa de Colombia

Francisco Javier Vélez Hoyos (Ph.D.) (C)

Universidad Cooperativa de Colombia

Mariana Peñuela (Ph.D.)

Universidad de Antioquia

Silvia Ochoa Cáceres (Ph.D.)

Universidad de Antioquia

Natalia Gómez (Ph.D.)

Universidad de Antioquia

Andrés Rojas (MSc.)

Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia

Franklin Ferraro Gómez (Ph.D.)

Universidad Católica Luis Amigó

Edgar Andrés Chavarriaga Miranda (Ph.D.)

Universidad Católica Luis Amigó

Victoria Elena Mesa Ochoa (Ph.D.)

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

3. Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)

Gustavo Alejandro Schweickardt

Conicet- Universidad Tecnológica Nacional - Argentina

Gina Paola Maestre Góngora (Ph.D.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Eder Alonso Acevedo Marín (MSc.)

Universidad Cooperativa de Colombia

Víctor Hugo Aristizábal Tique (Ph.D.) (C)

Universidad Cooperativa de Colombia

Camilo Andrés Flórez (Ing.)

Universidad Santo Tomás

Jim Giraldo (MSc.)

Institución Universitaria Pascual Bravo

Roberto Carlos Guevara Calume

Corporación Universitaria Remington

Jorge Mauricio Sepúlveda (Ph.D.) (C)
Corporación Universitaria Remington
David Alonso Hernández López (MSc.)
Corporación Universitaria Remington
Ingrid Durley Torres Pardo (Ph.D.) (C)
Universidad Católica Luis Amigó
Jorge Andrés Cock Ramírez (MSc.)
Universidad Católica Luis Amigó
Julián Darío Giraldo Ocampo (MSc.)
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Rubén Darío Vásquez Salazar (MSc.)
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

4. Estructuras, vías y transporte

Ronald Jesús Pena Pérez (MSc.)
Universidad Cooperativa de Colombia
Gustavo Alonso Arenas Zapata (Ing.)
Universidad Cooperativa de Colombia
Juan Carlos Pérez Soto (Ph.D.) (C)

Universidad Cooperativa de Colombia
Sandra Milena Acosta Lopera (Ing.)
Universidad Cooperativa de Colombia
Wilson Rodríguez Calderón
Universidad Cooperativa de Colombia
Iván Sarmiento (Ph.D.)
Universidad Nacional sede Medellín
Claudia Aldana (MSc.)
Universidad de Antioquia
Claudia Muñoz (Ph.D.) (C)
Universidad de Antioquia
Carlos Augusto Portilla Cubillos (Esp.)
Universidad Católica Luis Amigó
Diana Patricia Urrea R. (MSc.)
Corporación Universitaria Remington
Beatriz Elena Pineda Uribe
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Silvana Ruiz Moreno
Universidad de San Buenaventura

Resumen

El Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social fue organizado por la Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín, con la cooperación de doce Instituciones de Educación Superior de la ciudad. En este evento se presentaron avances y resultados de proyectos de investigación desarrollados por académicos e investigadores en formación de diferentes instituciones del país, enmarcados en las 4 líneas de investigación en ingeniería definidas para el evento: 1) Energía, agua y medio ambiente, 2) Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos, 3) Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y 4) Estructuras, vías y transporte. El público del congreso, conformado por estudiantes, profesores e investigadores de las distintas universidades, pudo conocer en conferencias

magistrales, paneles y ponencias, los aportes de destacados invitados provenientes de España, México, Brasil y Estados Unidos, además de conferencistas y panelistas nacionales. De este modo, el congreso se configuró como un espacio de comunicación entre las universidades, las entidades estatales y las empresas en torno al papel de la ingeniería, los proyectos de innovación y el desarrollo tecnológico, con miras al mejoramiento de la calidad de vida de nuestras comunidades y la sociedad. En el compendio de las memorias del evento se presenta un total de 20 trabajos que fueron socializados en la modalidad de ponencias, incluyendo diversidad de temáticas que van desde procesos biotecnológicos en fuentes de energía alternativa, hasta técnicas de simulación y modelamiento de sistemas industriales, aplicaciones y procesos informáticos y estudios sobre el desarrollo vial y el transporte.

Palabras claves: cuarta revolución industrial, energías alternativas, procesos biotecnológicos, transporte, vías.

Contenido

Prólogo	8
El Congreso	9
1. Energía, agua y medio ambiente	11
Implementación de tecnologías de aprovechamiento de energía fotovoltaica en instituciones prestadoras de servicios educativos: caso de estudio ITM campus Robledo	12
Carlos Esteban Aristizábal, José Luis González Manosalva, Alfredo Trespalacios Carrasquilla, Laima Klemas, Carlos Roberto Arango Gutiérrez	
Modelado matemático de sistemas fotovoltaicos considerando condiciones no uniformes de radiación y temperatura	18
Mariana Durango Flórez, Luz Adriana Trejos Grisales	
Análisis numérico de una bomba centrífuga de flujo mixto a través de CFD	22
Diego Penagos Vásquez, Oscar D. Monsalve Cifuentes, Sebastián Vélez García, Jonathan Graciano Uribe	
Construction of power coefficient curves for hydrokinetic turbines of horizontal axis by CFD	27
Juan Diego Betancur Gómez	
Optimización del rendimiento de una turbina Michell Banki utilizando algoritmos PSO Y BHO	30
Andrés Julián Pérez Rodríguez, Jorge Andrés Sierra Del Río, Diego Andrés Hincapié Zuluaga	
Evaluación de la gasificación de residuos maderables en zonas rurales para la generación de un <i>syngas</i> requerido como combustible dentro del proceso del beneficio seco del café	35
Carlos Esteban Aristizábal, José Luis González Manosalva, Alfredo Trespalacios Carrasquilla, Laima Klemas, Carlos Roberto Arango Gutiérrez	
Aplicación de ingeniería inversa para la reconstrucción del modelo CAD de la voluta de una bomba centrífuga de flujo radial	40
Óscar D. Monsalve-Cifuentes, Diego Penagos-Vásquez, Jorge Andrés Sierra-Del Río, Jonathan Graciano-Uribe	
2. Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos	45
Estudio preliminar de la estabilidad y comportamiento térmico de dispersiones de grafeno en diésel	46
Santiago Rivera Ospina, Karen Paola Cacia Madero	
Biodigestión del POME como alternativa energética y ambiental en las extractoras de aceite de palma	50
Daniel Domínguez Carvajal, Ana Marcela Mosquera Mena, John Alejandro Ruiz, Carlos Peláez, Mariana Peñuela Vásquez	
Obtención de biocarbón de aserrín de pino ciprés a partir de un pretratamiento de torrefacción e impacto en sus propiedades fisicoquímicas	55
Pedro Nel Alvarado Torres, Ricardo Antonio Mazo Restrepo, Fredy Esteban Jaramillo Ramírez	
La microalga <i>Desmodesmus armatus</i> como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio	59
Catalina Quevedo Ospina, Adriana Patricia Villegas Quiceno, Catalina Arroyave Quiceno, Mariana Peñuela Vásquez	

Producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de <i>Halomonas boliviensis</i> utilizando hidrolizado de gluten de trigo a escala biorreactor	64
Dalma Elizabeth Marsiglia López, Adriana Patricia Villegas Quiceno, Natalia Andrea Gómez Vaneas	
Estudio teórico y experimental del desempeño térmico del cambio de refrigerante en equipo de congelación de helados	69
Óscar Orlando García Agudelo, César Augusto García Orrego, Luis Fernando Cardona Sepúlveda	
3. Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)	73
Eficiencia energética e impacto ambiental como resultado de inteligencia artificial en el análisis de datos: aplicación en una planta de tratamiento de aguas residuales	74
Carlos Mario Sánchez Molina, Henry O. Sarmiento M.	
Mantenimiento 4.0: la importancia de la transformación digital en la industria colombiana	79
Leidy Marcela Dueñas Ramírez, Juan Pablo Mira Díaz, Juan Felipe Rodríguez Martínez, Nafer Efrén Lizarazo Cárdenas	
Análisis de la enseñanza de la <i>suite</i> ofimática LibreOffice como estrategia para reducir el índice de piratería en las empresas de la subregión de Urabá	84
Jorge Iván Quintero Peláez	
Modelo de control de calidad de procesos aplicando mapas cognitivos difusos	88
Juan Miguel Cogollo Flórez, Orfani Margot Valencia Mena	
4. Estructuras, vías y transporte	95
Diagnóstico de tipología de suelos, cimentaciones y altura de pisos de Sabaneta y el cambio que genera la microzonificación 2017 en comparación con la NSR-10	96
Carlos Augusto Portilla Cubillos, Diana Patricia Urrea Ramírez	
Determinación del efecto de la incorporación de diferentes polímeros termoplásticos en el desempeño ambiental de mezclas de asfalto	101
Daniela Andrea Monterrosa Álvarez, Harveth Hernán Gil Sánchez	
Diseño vial con seguridad en adelantamiento	107
Beatriz Elena Pineda Uribe, John Jairo Posada Henao	

Prólogo

Este Congreso ha nacido con la finalidad de articular la academia, la investigación y la innovación, en aras de fortalecer el desarrollo social y crear sinergias que permitan plantear nuevos retos para los ingenieros del país. En palabras de la Unesco-Iesalc: Las Instituciones de Educación Superior deben avanzar en la configuración de una relación más activa con sus contextos. La calidad está vinculada a la pertinencia y la responsabilidad con el desarrollo sostenible de la sociedad. Ello exige impulsar un modelo académico caracterizado por la indagación de los problemas en sus contextos; la producción y transferencia del valor social de los conocimientos; el trabajo conjunto con las comunidades; una investigación científica, tecnológica, humanística y artística fundada en la definición explícita de problemas a atender, de solución fundamental para el desarrollo del país o la región, y el bienestar de la población; una activa labor de divulgación, vinculada a la creación de conciencia ciudadana sustentada en el respeto a los derechos humanos y la diversidad cultural; un trabajo de extensión que enriquezca la formación, colabore en detectar problemas para la agenda de investigación y cree espacios de acción conjunta con distintos actores sociales, especialmente los más postergados.

Con la implementación del modelo educativo crítico con enfoque de competencias, la Universidad Cooperativa de Colombia es claramente responsable al orientar e integrar esfuerzos para favorecer un tipo de educación que contribuya a la activación de una ciudadanía que comprometa y empodere a individuos y a colectividades, con aporte de soluciones innovadoras y sostenibles a problemas complejos como la pobreza, la sostenibilidad ambiental, la inequidad y la exclusión social, entre otros. En ello, el modelo pedagógico crítico con enfoque de competencias que fue implementado abre paso a un paradigma de pensamiento y acción, referido a la necesidad y el compromiso de generar acciones de servicio a la sociedad que implican una gestión intencionada con los grupos de interés (Estado,

empresa, comunidad), en procura del bienestar de la sociedad, con enfoque territorial y armónico en el contexto global. Adquiere mayor valor este postulado cuando se fundamenta en los principios de la economía solidaria, objetivos de desarrollo sostenible y pacto global.

La Universidad, a partir de su condición multicampus con presencia en diecinueve ciudades de Colombia, se identifica con los planteamientos relacionados con la particularidad de las regiones como estrategia adecuada para el cierre de brechas; reconoce capacidades y actores, y fomenta la interacción, generando empleo y poniendo al servicio del territorio sus capacidades misionales. Además, se proyecta al entorno, en especial con las comunidades más vulnerables, transfiriendo principios de la economía solidaria con egresados responsables y procurando que la participación, la equidad, la inclusión, la solidaridad, la articulación y el desarrollo sostenible sean parte de la cultura de quienes conforman tales sociedades.

Este congreso internacional posibilita el debate sobre los retos de la ingeniería para los actuales y nuevos ingenieros desde lo técnico y desde lo ético, puesto que el desarrollo del país requiere profesionales competentes, capaces de resolver problemas acordes con las dinámicas cambiantes de nuestro entorno.

Para este evento, se ha contado con el apoyo de varias instituciones que buscan converger en el progreso de la región, que actualmente enfrenta el reto de seguir siendo una de las ciudades más innovadoras del mundo y el líder de la cuarta revolución industrial en el país.

Que este sea entonces el momento de agradecer a todas las universidades que trabajaron con nosotros en la materialización de este proyecto; y también a la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos - SAI, al Consejo Profesional Nacional de Ingeniería - Copnia, al Icetex a través de su programa Fellows Colombia, al Municipio de Medellín, a Empresas Públicas de Medellín, a Ruta N, al Área Metropolitana de Medellín y al Greater Bureau Medellín por su apoyo. Muchas gracias también a nuestros panelistas y conferencistas nacionales e internacionales.

El Congreso

Durante los días 5 y 6 de septiembre del año 2019 se llevó a cabo el Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social (CIISOL 2019), convocado y organizado por la Universidad Cooperativa de Colombia sede Medellín, con la cooperación de doce Instituciones de Educación Superior de Medellín y de Antioquia, y con el apoyo de la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos - SAI, el Consejo Profesional Nacional de Ingeniería - Copnia, el Icetex a través de su programa Fellows Colombia, el Municipio de Medellín, el Greater Bureau Medellín, Empresas Públicas de Medellín, Ruta N y el Área Metropolitana de Medellín.

A este evento se vincularon las siguientes Instituciones de Educación Superior:

Universidad de Antioquia
 Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
 Corporación Universitaria Remington
 Universidad de San Buenaventura sede Medellín
 Instituto Tecnológico Metropolitano
 Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
 Universidad Santo Tomás sede Medellín
 Universidad de Medellín
 Universidad Pontificia Bolivariana
 Universidad Católica del Norte
 Universidad Católica Luis Amigó
 Corporación Universitaria Minuto de Dios

El apoyo de las universidades incluyó la participación de académicos y estudiantes en los comités conformados: comité académico-organizador, comité científico-evaluador y comité logístico; participaron en las reuniones de gestión y organización, en la evaluación de los trabajos sometidos, en la promoción del evento, en la consecución de aportes y en el manejo de aulas y apoyo logístico durante el evento. Así mismo, las universidades aportaron con la participación de conferencistas dentro de las cuatro líneas temáticas con las que se orientó el desarrollo del congreso:

1. Energía, agua y medio ambiente
2. Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos
3. Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)
4. Estructuras, vías y transporte

El público, conformado por estudiantes, profesores e investigadores de las distintas universidades, pudo conocer en conferencias magistrales, conferencias temáticas, paneles y ponencias, los aportes de siete destacados conferencistas internacionales invitados de España, México, Brasil y Estados Unidos, veintiún conferencistas nacionales y veinticuatro panelistas nacionales. Todos ellos constituyeron un espacio de información, comunicación y discusión entre las universidades, las entidades estatales y las empresas en torno al papel de la ingeniería, los proyectos de innovación y el desarrollo tecnológico, con miras al mejoramiento de la calidad de vida de nuestras comunidades y la sociedad en general. Esta interacción permitió fortalecer las redes existentes, generar nuevas alianzas y propósitos de cooperación, y promover el posicionamiento de la universidad.

Conferencistas internacionales

Eva Balsa Canto, Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC, España
 Francesc Robusté Antón, Universidad Politécnica de Cataluña - BarcelonaTech
 Mauricio Trujillo Roldán, Universidad Nacional Autónoma de México
 Norma Adriana Valdez Cruz, Universidad Nacional Autónoma de México
 Edmundo Herrera Reyes, Autodesk Inc.
 Celso Eduardo Lins de Oliveira, Universidad de São Paulo
 Enrique Villa Huerta, Surfax México

Conferencistas nacionales

Andrés Adolfo Amell Arrieta,
Universidad de Antioquia

Farid Chejne Janna, Universidad
Nacional de Colombia

Ricardo León Bonnet Díaz, Universidad
de Medellín

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, Uni-
versidad Nacional de Colombia

Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia,
Universidad Nacional de Colombia

Laima Klemas, ISA, ITM

Jaime Alberto Guzmán Luna, Univer-
sidad Nacional de Colombia

Érica Mejía Restrepo, Institución Uni-
versitaria Pascual Bravo

Juan Andrés Oviedo Amézquita, Aso-
ciación de Ingenieros Estructurales de
Antioquia (AIE)

Albeiro Cuesta Mesa, consultor temáti-
cas TI en los sectores de industria, aca-
demia y gobierno

Ricardo Moreno Sánchez, Universidad
de Antioquia

Andrés Emiro Díez Restrepo, Univer-
sidad Pontificia Bolivariana

Panelistas de Retos y desafíos de la Ingeniería en un mundo globalizado

Enrique Posada Restrepo, Presidente de
la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y
Arquitectos (SAI)

Elkin Echeverri García, Director de
Planeación y Prospectiva de Ruta N

Francesc Robusté Antón, Universidad
Politécnica de Cataluña, España

Robinson Arturo Miranda Gómez,
Director Ambiental y Social del
Proyecto Hidroituango EPM

Adriana Patricia Villegas Quiceno,
Decana de la Facultad de Ingeniería,
Universidad Cooperativa de Colombia

Panelistas de Retos y desafíos de la Ingeniería desde la ética

Richard Steve Ramírez Grisales,
Magistrado auxiliar de la Corte
Constitucional

Camilo Andrés Garzón Correa, Jefe
de programa, Facultad de Derecho,
Universidad Cooperativa de Colombia

Juan David Moreno Aristizábal,
Unidad de Gestión de Riesgo del Área
Metropolitana del Valle de Aburrá

Juan Guillermo Arbeláez Zapata,
Secretario Seccional de Antioquia
COPNIA

Mauricio Trujillo Roldán, Director de
la Unidad de Bioprocesos del Instituto
de Investigaciones Biomédicas,
Universidad Nacional Autónoma de
México

1. Energía, agua y medio ambiente

Implementación de tecnologías de aprovechamiento de energía fotovoltaica en instituciones prestadoras de servicios educativos: caso de estudio ITM campus Robledo

Carlos Esteban Aristizábal
José Luis González Manosalva
Alfredo Trespacios Carrasquilla
Laima Klemas
Carlos Roberto Arango Gutiérrez

Instituto Tecnológico
Metropolitano
carlosaristizabal207157@correo.
itm.edu.co

Resumen

El presente artículo muestra cómo sería la integración de un sistema de generación de energía eléctrica, utilizando módulos solares policristalinos con la red interconectada que le suministra energía eléctrica en la actualidad al ITM, mediante un análisis técnico, ambiental y económico. Se consideran tres escenarios: 80 000, 100 000 y 120 000 kWh de demanda mensual cubierta con esta fuente renovable. Con 100 000 kWh/mes, se lograría una reducción del 44,21% y con 120 000 kWh/mes, una del 47,5% con respecto a la situación actual. En términos económicos, se calcula el indicador financiero TIR (tasa interna de retorno) para un horizonte de tiempo de tres años y considerando los ahorros en la compra de energía eléctrica como ingresos, debido a que estos recursos pueden ser reinvertidos en el mejoramiento de la operación de la institución. El mejor escenario sería el de 100 000 kWh/mes, ya que este presenta la TIR más alta e inversión inicial, costos de instalación y mantenimiento más bajos, mientras que el de 120 000 kWh/mes presenta una TIR menor y costos operativos más altos.

Palabras clave: análisis técnico-económico, energía renovable, huella de carbono, sistema fotovoltaico, universidad.

Introducción

El cambio del uso de métodos convencionales para la generación de energía eléctrica por tecnologías que utilizan recursos energéticos renovables, tales como energía fotovoltaica, energía eólica, biomasa y energía mareomotriz, entre otras, trae beneficios económicos, sociales y ambientales para la organización y la comunidad en general [1], [2]. Además, le permite al ente implementador una autonomía y sostenibilidad en términos energéticos y de operación, ya que la energía es primordial para el desarrollo de todos los sectores de la economía [3].

Es por estas razones que las universidades alrededor del mundo han emprendido iniciativas y esfuerzos en reducir su huella ecológica, en pro de ser más competitivas y sostenibles [4], [5]. Por ejemplo, muchas de ellas han implementado sistemas de gestión ambiental (SGA), con los cuales por lo general se busca hacer un uso racional y sostenible de los recursos mäsicos y energéticos [4], [6].

Este documento se enfoca en el análisis de la posible implementación de energía solar fotovoltaica en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM) campus Robledo, como alternativa para disminuir su huella de carbono, ser energéticamente autónomo y reducir costos de operación. Todo esto, acudiendo a literatura científica para identificar referentes, criterios de selección y aplicación de las diferentes tecnologías en energía solar, costos, y conocer las barreras y oportunidades, entre otros aspectos técnico-económicos de relevancia.

Metodología

En la figura 1, se muestra el esquema metodológico y estratégico para lograr una mitigación de emisión de GEI en instituciones universitarias, implementando energías alternativas:

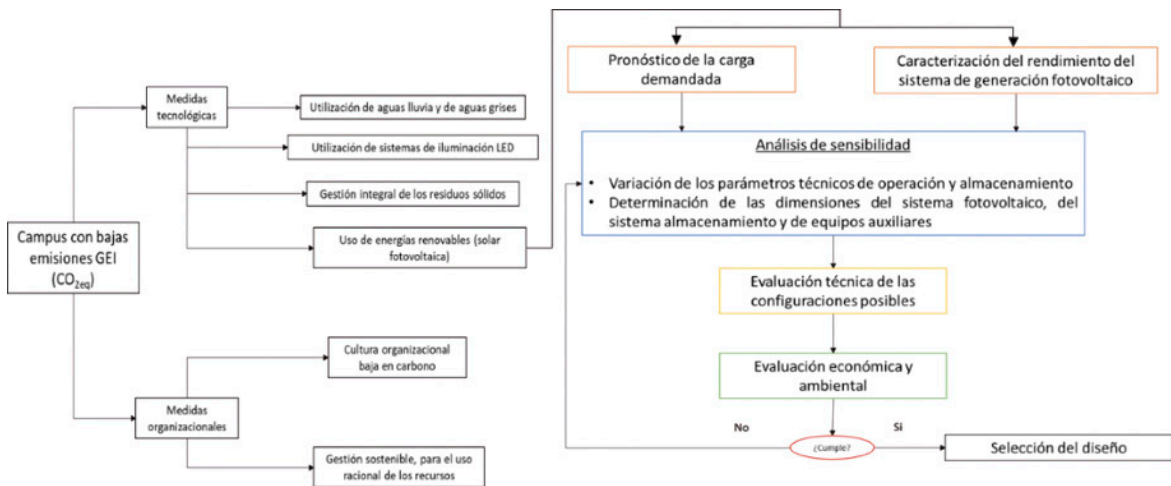


Figura 1. Esquema metodológico y estratégico de la implementación de energías alternativas en instituciones universitarias

Fuente: elaboración propia

En la figura 2, se muestran las ecuaciones de dimensionamiento del sistema de generación de energía eléctrica utilizando paneles solares:

Metodología establecida por **Daniela Mewes et al. (2017)**, para la sección de las zonas adecuadas de ubicación de los paneles solares

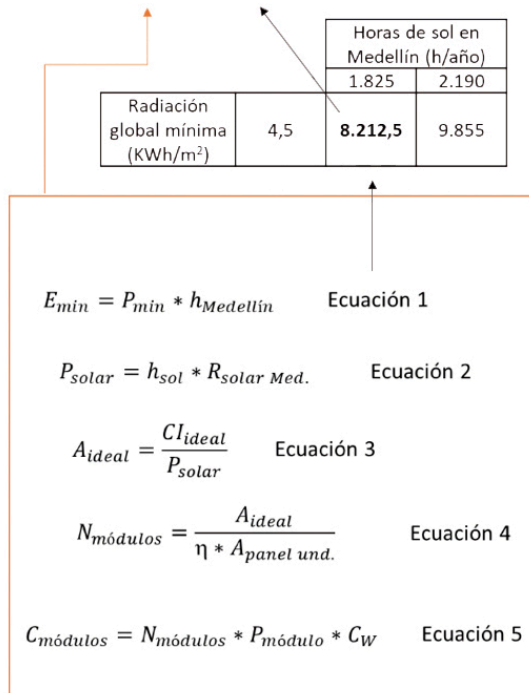


Figura 2. Ecuaciones y dimensionamiento del sistema de paneles solares

Fuente: elaboración propia

La tabla 1 muestra la descripción del módulo fotovoltaico, utilizado para realizar el dimensionamiento del sistema de generación de energía eléctrica no convencional.

Tabla 1. Características de diseño y funcionales para módulos solares policristalinos (módulo manufacturado en China)

Precio	(USD 0,38/W (FOB))
TYPE	PW300-156-72M
Peak Power (W_p)	305 W_p
Efficiency rate	15,46%
Power Tolerance	±3%
Size of Module	1956×992×40 MM (1,94 M²)
Cell Type	POLYCRYSTALLINE
Operating temperatures	-40 °C ~+90 °C

Fuente: elaboración propia

Resultados

1. Análisis técnico

En la tabla 2, se muestran los resultados de la cantidad de módulos que son necesarios para satisfacer la condición de generación de energía eléctrica considerada en los escenarios. Esto se hizo con base en las condiciones ambientales y de radiación solar de Medellín. Adicionalmente, en la tabla 3 se ilustran los costos de los módulos, los de instalación y los operativos.

Tabla 2. Información del número de módulos necesarios y la inversión para el estudio de los escenarios considerados

Generación ideal (kWh/mes)	Generación ideal (kWh/día)	A_{ideal} (m²)	A_{real} (m²)	$N_{módulos}$	Costo módulos (USD)
80 000	2666,67	118,52	766,61	395	45 799
100 000	3333,33	148,15	958,27	494	57 249
120 000	4000	177,78	1149,92	593	68 699

Fuente: elaboración propia

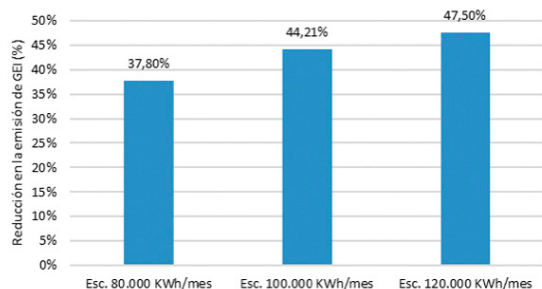
Tabla 3. Costos de instalación, operación y mantenimiento para los casos estudiados

Generación ideal (kWh/mes)	N _{módulos}	Capacidad instalada (kW _p)	Costo instalación (USD)	Costos operativos y de mantenimiento (USD/año)
80 000	395	120,48	6870	7078,2
100 000	494	150,67	8587	8851,86
120 000	593	180,87	10 305	10 625,82

Fuente: elaboración propia

Análisis ambiental

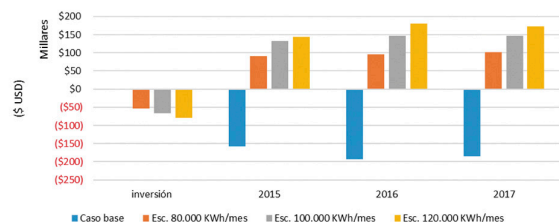
En la figura 3, se ilustra la reducción en porcentaje de las emisiones de GEI (tonCO₂eq), si fuesen considerados los distintos escenarios, para el periodo 2015-2017.

**Figura 3.** Porcentaje (%) de reducción en las emisiones de GEI para los diferentes escenarios en función de la generación fotovoltaica

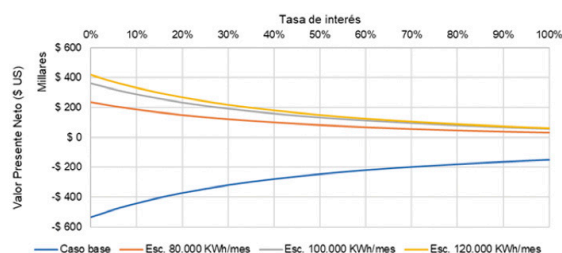
Fuente: elaboración propia

Análisis económico

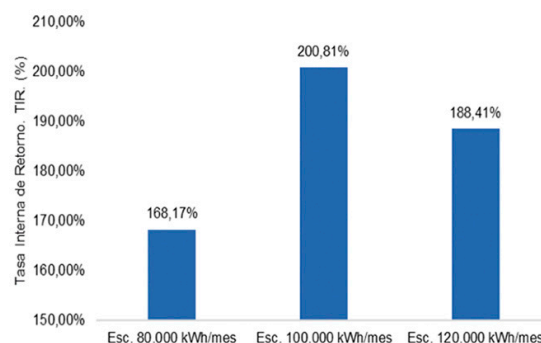
Este análisis corresponde a la situación en la que los ahorros en compra de energía eléctrica son considerados e incluidos como ingresos. En la figura 4, se muestra el flujo de caja; en la figura 5a, el valor presente neto (VPN); y en la figura 5b, la tasa interna de retorno (TIR),

**Figura 4.** Flujo de caja para los diferentes escenarios estudiados, considerando los ahorros como ingresos

Fuente: elaboración propia



(a)



(b)

Figura 5. (a) Valor presente neto (VPN) versus la tasa de interés; (b) tasa interna de retorno (TIR) para los diferentes escenarios estudiados considerando los ahorros como ingresos

Fuente: elaboración propia

En este análisis, se incluye la tarifa del impuesto al carbono que sería de COP 15000 por tonelada de CO₂ emitida, y que los proyectos en energías renovables y de mitigación de emisiones de GEI en el interior de organizaciones podrán descontar del pago de este impuesto o vender los excedentes de esta mitigación como bonos de carbono [7]. Este instrumento económico-ambiental le permitiría al ITM tener otra forma de solventar la posible inversión en tecnología fotovoltaica, ya que dada la naturaleza de la venta de estos bonos, se trata este dinero como ingresos del proyecto, porque pueden ser vendidos a entidades

que en virtud de su razón social quemen combustibles fósiles para la obtención de energía térmica. En la tabla 4, se ilustran los flujos de caja asociados a este impuesto para los distintos escenarios estudiados.

Tabla 4. Flujos de caja (USD) asociados a la venta de bonos de carbono (USD 5/tonCO₂eq o COP 15 000/tonCO₂eq) en Colombia para los casos estudiados

Año	Escenario 80 000 kWh/mes (USD)	Escenario 100 000 kWh/mes (USD)	Escenario 120 000 kWh/mes (USD)
2015	439	512	535
2016	447	529	581
2017	450	522	563

Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, se incluye como alternativa la implementación de un sistema de pagos ambientales por compensación de las emisiones de GEI, mediante el uso del aplicativo <http://www.banco2.com/empresas>, el cual establece un valor de USD 2,67 por tonCO₂ para compensar a través de la conservación de bosques en Antioquia (Colombia). En la tabla 5, se describe el pago por la compensación y mitigación de GEI para los escenarios considerados en el presente estudio.

Tabla 5. Flujos de dinero (USD) asociados al pago por compensación y mitigación de GEI para los escenarios considerados

Año	Caso base	Escenario 80 000 kWh/mes (USD)	Escenario 100 000 kWh/mes (USD)	Escenario 120 000 kWh/mes (USD)
2015	602	368	329	317
2016	652	413	370	342
2017	631	391	353	331

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

La instalación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando módulos solares evita la emisión de grandes cantidades de CO₂. Por ejemplo, si esta tecnología se hubiera instalado a principios de 2015,

se habría evitado, hasta finales de 2017, un total de 37,8% de las emisiones de GEI asociadas al consumo de electricidad del Sistema Nacional Interconectado; esto si el sistema de generación fotovoltaico tuviera una generación de electricidad de 80 000 kWh/mes. Con 100 000 kWh/mes, se lograría una reducción del 44,21% y con 120 000 kWh/mes, una del 47,5%, lo que ayudaría a cumplir la visión institucional del ITM de ser sostenible y respetuosa con el medio ambiente al fomentar el uso de energías limpias que ayuden a mitigar en parte los efectos del cambio climático.

El pago por la compensación de las emisiones de GEI es una alternativa para mitigar las emisiones y llevar a la institución a ser carbono neutro. Sin embargo, el presente estudio demuestra que es más rentable y sostenible la implementación de proyectos que busquen disminuir o mitigar la emisión de GEI sin afectar la calidad y normalidad de la operación de la institución; por ejemplo, el cambio del suministro de electricidad convencional por energía solar.

Referencias

- [1] J. Lee, B. Chang, C. Aktas y R. Gorthala, "Economic Feasibility of Campus-Wide Photovoltaic Systems in New England", *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 452-464, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.009>
- [2] E. Strantzali y K. Aravossis, "Decision making in Renewable Energy Investments: A Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 885-898, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021>
- [3] M. Lang, "From Industry 4.0 to Energy 4.0: Future Business, Models and Legal Relations", *Digital Business Law*, 2016. [En línea]. Disponible: <https://digitalbusiness.law/2016/04/from-industry-4-0-to-energy-4-0-future-business-models-and-legal-relations/>
- [4] H. Liu, X. Wang, J. Yang, X. Zhou y Y. Liu, "The Ecological Footprint Evaluation of Low Carbon Campuses based on Life Cycle Assessment: A Case Study of Tianjin, China", *J. Clean. Prod.*, vol. 144, pp. 266-278, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.017>
- [5] A. Disterheft, S. Ferreira, M. Ramos and D. M. Ulisses, "Environmental Management Systems (EMS) Implementation Processes and Practices in European Higher Education Institutions — Top-down versus Participatory Approaches", *J. Clean. Prod.*, vol. 31, pp. 80-90, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.034>

- [6] D. Mewes *et al.*, “Evaluation Methods for Photovoltaic Installations on Existing Buildings at the KTH Campus in Stockholm, Sweden”, *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 409-422, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.038>
- [7] PWC, “DIAN emite concepto general del Impuesto Nacional al Carbono Ley 1819 de 2016”, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.pwcimpuestosonline.co/TLS-Times/Lists/Noticias/ver.aspx?ID=1371>

Modelado matemático de sistemas fotovoltaicos considerando condiciones no uniformes de radiación y temperatura

Mariana Durango Flórez
Luz Adriana Trejos Grisales

Instituto Tecnológico
Metropolitano
marianadurango134392@correo.
itm.edu.co

Resumen

El modelado matemático de los arreglos fotovoltaicos (PV) es parte esencial en su dimensionamiento; la temperatura y la radiación solar han sido reconocidas como variables que afectan la potencia generada por el sistema PV. Por ende, el hecho de considerar condiciones uniformes para los módulos del arreglo fotovoltaico en un ambiente real resulta en medidas inexactas. En este trabajo, se presenta la implementación de un algoritmo capaz de predecir la potencia de cualquier arreglo fotovoltaico, calculando los parámetros circuitales de cada módulo del arreglo en condiciones ambientales reales. La implementación propuesta es validada a través de la comparación con simulaciones del modelo circuital implementado en Simulink, lo cual demuestra exactitud en la predicción de la potencia. Además, se evidenció la sobreestimación de potencia cuando se consideran condiciones de temperatura uniformes para los módulos del arreglo.

Palabras clave: eficiencia, modelado, sistemas fotovoltaicos, temperatura.

Introducción

El crecimiento de la capacidad instalada proveniente de energías renovables fue del 7,9% en el año 2018, dentro del cual la energía solar fotovoltaica (pv) aportó el 84% [1], lo cual posicionó a este tipo de energía como una opción competitiva. En la actualidad, los sistemas pv están siendo instalados no solo en terrazas y campos abiertos, sino también en áreas acuáticas como lagos, dando lugar a lo que se conoce como plantas pv flotantes [2], en las que se hace más relevante considerar las condiciones de temperatura y radiación reales, ya que están directamente relacionadas con la potencia entregada por los módulos pv [3].

El módulo solar no convierte la totalidad de la radiación solar en energía eléctrica; luego, al aumentar la temperatura ambiente, la radiación remanente se convierte en calor dentro de la celda, provocando un aumento en la temperatura de operación del módulo y disminuyendo entre 10 y 15% la potencia suministrada por el módulo pv [4]. Asumir condiciones uniformes de temperatura (por ejemplo, 25 °C) puede ocasionar imprecisiones en el dimensionamiento de la instalación pv. La figura 1 muestra el perfil de potencia-voltaje (p-v) de un módulo de 85 W trabajando a diferentes temperaturas: los perfiles muestran que a una temperatura real (48 °C) se obtiene una potencia máxima de 67,48 W, en contraste con el valor obtenido a temperatura estándar (25 °C), con la que se obtiene un máximo igual a 91,07 W, lo cual implica una sobreestimación en la potencia entregada de aproximadamente 44,09%.

Para evitar la sobreestimación de potencia, el análisis de los sistemas pv debe considerar el efecto de la temperatura. Por tanto, en este trabajo se propone la implementación de un algoritmo que modela el comportamiento eléctrico de cualquier arreglo pv operando bajo condiciones ambientales reales, es decir, considerando sombreado y temperatura en cada módulo. El algoritmo permite obtener los parámetros circuitales de cada módulo para calcular la potencia entregada por el arreglo pv bajo un perfil de radiación definido.

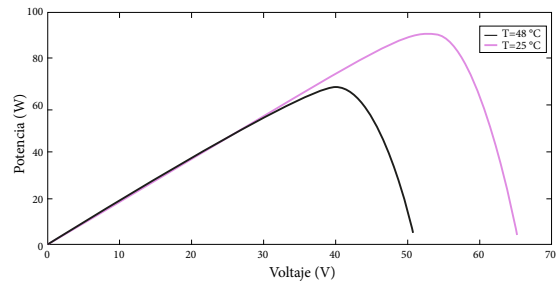


Figura 1. Comparación de perfiles V vs. P, temperatura ambiente y temperatura real

Fuente: elaboración propia

Metodología

Este trabajo se realizó en dos etapas: la primera, el análisis del modelo circuital y matemático de los módulos pv y la segunda implementación del algoritmo para obtener la potencia entregada por un sistema pv; dicho algoritmo se implementó en Matlab con el fin de validarlo con simulaciones circuitales ejecutadas en el entorno Simulink.

Modelo matemático

Los cálculos de corriente y voltaje para el arreglo pv fueron realizados con el algoritmo reportado en [5], haciendo las modificaciones necesarias para ingresar los datos de temperatura de cada módulo y las condiciones de sombreado del arreglo pv. Las ecuaciones utilizadas en el procedimiento mencionado anteriormente para encontrar los parámetros que modelan la relación corriente-voltaje (I-V) para la celda pv se adoptaron de [6] y [7]; los valores de los cinco parámetros del modelo de un diodo (SDM), expresado mediante la ecuación (1), son encontrados para cada módulo pv. Las ecuaciones (2) y (3) corresponden a la Band-gap del silicio en el cual los parámetros de ajuste son $E_g(0) = 1,166$ eV, $\alpha = 0,473$ meV/K y $\beta = 636$ K [6] y al factor de idealidad del diodo,

respectivamente. La ecuación (4) expresa la corriente de saturación del diodo con $K=1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, $q=1,602176 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y T es la temperatura ambiente que recibe el módulo en grados K.

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{N_s n K T}} - 1 \right) + \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\alpha_v - \frac{V_{oc}}{T}}{N_s V_t \left(\frac{\alpha_i}{I_{ph}} - \frac{3}{T} - \frac{E_{gap}}{k T^2} \right)} \quad (3)$$

$$I_{sat} \approx I_{ph} e^{-\left(\frac{V_{oc}}{\eta N_s V_t} \right)} \text{ donde } V_t = \frac{K T}{q} \quad (4)$$

El cambio de variable x se hizo para simplificar las ecuaciones no lineales que son resueltas por medio de la función Lambert W basada en series de Taylor, cuya forma explícita se encuentra en (5), esto para encontrar la resistencia en serie R_s de (6) y la resistencia en paralelo R_{sh} de (7):

$$x = W \left[\frac{V_{mpp} (2I_{mpp} - I_{ph}) e^{\frac{V_{mpp} (V_{mpp} - 2N_s \eta V_t)}{N_s^2 \eta^2 V_t^2}}}{N_s \eta I_{sat} V_t} \right] + 2 \frac{V_{mpp}}{N_s \eta V_t} - \frac{V_{mpp}^2}{N_s^2 \eta^2 V_t^2} \quad (5)$$

$$R_s = \frac{x N_s \eta V_t - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (6)$$

$$R_{sh} = \frac{x N_s \eta V_t}{I_{ph} - I_{mpp} - I_{sat} (e^x - 1)} \quad (6)$$

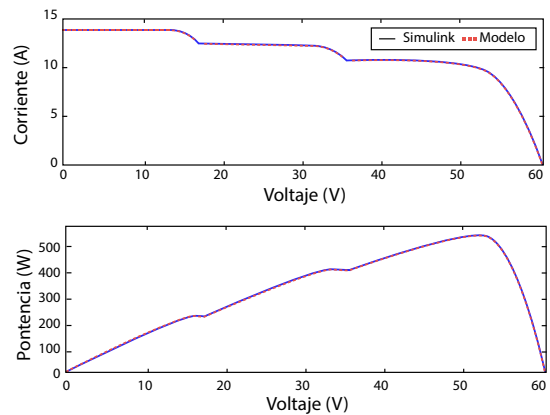
Modelo circuital en entorno Simulink

La simulación circuital para validar la implementación propuesta consta de nueve subsistemas que representan los módulos pv, en los cuales los valores

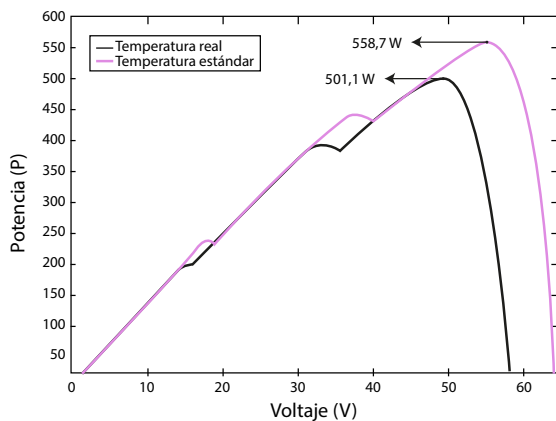
de los cinco parámetros de cada módulo, incluyendo el diodo bypass, fueron los calculados por el algoritmo en Matlab. La validación de la implementación presentada del algoritmo con el circuital y la comparación con los valores de potencia obtenidos a temperatura estándar (por ejemplo, 25 °C), donde se asume que los parámetros de cada módulo son iguales, fueron las pruebas efectuadas para este trabajo. La conexión entre *strings* en el arreglo pv de tamaño 3x3 tanto para Simulink como para el algoritmo, y el perfil de radiación emulando condiciones de sombreado parcial fueron los mismos; de igual manera, la temperatura trabajada para cada módulo en la implementación propuesta fue considerada para valores medidos en módulos BP585 entre 34 y 42 °C.

Resultados

La figura 3a muestra las curvas i-v que validan el modelado propuesto a través de la comparación con la simulación circuital en Simulink. El error obtenido entre el modelo circuital de Simulink y la implementación propuesta es bajo. Aplicando el MAPE [8], se encuentra que este error corresponde al 0,0225%, por lo cual se considera que la predicción realizada por el algoritmo implementado fue precisa al considerar los parámetros que representan el módulo pv diferentes para cada módulo, evitando una sobreestimación de la potencia que entrega el arreglo pv en condiciones ambientales reales.



(a)



(b)

Figura 2. Validación de modelo propuesto con modelo circuital de Simulink

Fuente: elaboración propia

La figura 2b muestra las curvas i-v del mismo arreglo pv considerando temperatura real y temperatura estándar y uniforme en cada módulo, es decir, considerando los mismos parámetros eléctricos para cada módulo. Puede evidenciarse que tal suposición de igualdad de parámetros entre los módulos pv introduce una sobreestimación de potencia. En este caso, se obtuvo un GMPP (punto global de máxima potencia) de 558,7 W considerando temperatura uniforme y un GMPP de 501,1 W considerando temperatura real. El error porcentual [9] corresponde al 11,5%.

Conclusiones

Aquí, ha sido presentada la implementación de un algoritmo que modela el comportamiento eléctrico de cualquier arreglo pv operando en condiciones ambientales reales. Tal implementación propuesta obtiene los parámetros circuital de cada módulo para calcular la potencia entregada por el arreglo pv con un perfil de radiación y de temperatura definido. Este algoritmo fue validado con un modelo circuital en el entorno Simulink, con el cual se obtuvo un MAPE del 0,0225%, lo que demuestra buena precisión; por otro lado, al realizarse la comparación con un perfil p-v modelado con parámetros iguales para los módulos del arreglo pv, se obtuvo que tal suposición podría llevar a una sobreestimación de potencia del 11,5% en unas condiciones dadas.

Finalmente, el cálculo de los parámetros del SDM por módulo permite mejorar la precisión de la predicción de la energía entregada por el sistema pv; al asumir igualdad de condiciones de operación, se ignora el hecho de que al estar en condiciones de sombreado, los módulos tienden a estar a una temperatura más baja en contraste con los que reciben en toda su área la radiación solar; esto provoca que, en aplicaciones como el diseño de instalaciones fotovoltaicas, se hagan cálculos incorrectos y resulte una estructura menos eficiente.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable capacity statistics 2019". [En línea], 2019. Disponible: <https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019>
- [2] C. Young-Kwan, "A Study on Power Generation Analysis of Floating pv System Considering Environmental Impact", *International Journal of Software Engineering and its Applications*, vol. 8, n.º 1, pp. 75-84, 2014.
- [3] E. Skoplaki y J. Palyvos, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module", *Solar Energy*, vol. 83, pp. 614-624, 2009.
- [4] R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot y G. M. Tina, "Floating Tracking Ccooling Concentrating (FTCC) Systems", presentado en *38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Austin, Texas, 2012, pp. 514-519.
- [5] J. D. Bastidas-Rodríguez, L. A. Trejos-Grisales, D. González-Montoya, C. A. Ramos-Paja, G. Petrone y G. Spagnuolo, "General Modeling Procedure for Photovoltaic Arrays", *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 67-79, 2018.
- [6] W. De Soto, S. Klein y W. Beckman, "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance", *Solar Energy*, vol. 80, pp. 78-88, 2006.
- [7] J. Accarino, G. Petrone, C. Ramos-Paja y G. Spagnuolo, "Symbolic Algebra for the Calculation of the Series and Parallel Resistances in pv module model", presentado en *4th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Alghero, Italia, 2013, pp. 62-66.
- [8] S. Kim y H. Kim, "A New Metric of Absolute Percentage Error for Intermittent Demand Forecasts", *International Journal of Forecasting*, vol. 32, n.º 3, pp. 669-679, 2016.
- [9] S. R. Scurro, "Introduction to Error Theory", *Physics Laboratory*, 2005. doi: <https://doi.org/10.13140/2.1.3466.5760>

Análisis numérico de una bomba centrífuga de flujo mixto a través de CFD

Diego Penagos Vásquez
Oscar D. Monsalve Cifuentes
Sebastián Vélez García
Jonathan Graciano Uribe

Instituto Tecnológico
Metropolitano
diegopenagos230276@correo.itm.
edu.co

Resumen

Una bomba centrífuga de flujo mixto es un dispositivo de bombeo que permite transmitir mayor rango de caudal, disminuyendo su cabeza. Es el tipo de bomba de transición entre la radial y la axial. Junto a la de flujo axial, es ampliamente utilizada en sistemas de riego y labores de agricultura, debido al gran flujo de agua que pueden transportar a bajas y medianas alturas. El análisis de dinámica de fluidos computacional es una herramienta que permite estudiar el comportamiento del flujo interno del impulsor y la voluta, a fin de obtener magnitudes físicas que lleven al ahorro de tiempo y costos en pruebas experimentales. La presente investigación estudia el comportamiento fluidodinámico de una bomba comercial de Ns 93,75 para generar su curva característica por medio de simulaciones numéricas. A través del *software* ANSYS, se llevó a cabo el análisis que permitió modelar y discretizar el volumen del fluido que pasa por medio del impulsor y la voluta con base en condiciones del punto máximo de eficiencia; luego, se refinaron las paredes de ambos volúmenes; después, se configuraron las condiciones de frontera en la entrada, salida e interfaces y el modelo de turbulencia. Finalmente, se obtuvo la curva característica que relaciona el caudal de salida de la bomba respecto a la cabeza de altura, donde se obtuvo una semejanza con respecto al gráfico proporcionado por el fabricante, con un error inferior al 9%, validando el método numérico utilizado para el estudio fluidodinámico de la bomba centrífuga de flujo mixto.

Palabras clave: bomba hidráulica, flujo mixto, perfil hidráulico, simulación numérica, volumen de control.

Introducción

Una bomba centrífuga es un dispositivo de bombeo que transforma la energía cinética del agua en energía de presión, con el fin de elevar un fluido a un sitio de mayor altura. Su impacto social se puede observar en las zonas rurales para su uso en la irrigación y el transporte de agua, beneficiando a la población dependiente de la agricultura [1]. Por otra parte, las bombas centrífugas se clasifican en tres tipos: flujo radial, mixto y axial; estas difieren en la forma como transmiten el fluido, en su relación de caudal y altura de elevación, y en su geometría.

Se han realizado estudios CFD para analizar fluidodinámicamente estas turbomáquinas, debido a que los resultados obtenidos mediante herramientas computacionales permiten observar contornos de presión, velocidad y comportamiento de la partícula a medida que se transporta por la bomba; se ha determinado el comportamiento de bombas centrífugas radiales, mixtas y axiales [2]-[4], validando su método numérico con datos experimentales y obteniendo similitudes entre sí. El objetivo del módulo de diseño computacional de bombas (CPD) es conocer el comportamiento de la turbomáquina a través del modelamiento del impulsor y la voluta.

Lo anterior se ha visto reflejado en las investigaciones realizadas por S. Rajendran [5] y por Muttalli, Agrawal y Warudkar [6], las cuales generaron contornos de presión y velocidad en el volumen de control que representa el fluido en el interior del impulsor, observando el comportamiento interno de este elemento rotativo de la bomba. Las investigaciones preliminares tienen vacíos en el estudio del efecto de viscosidad en las paredes, en consecuencia de la ausencia de inflación en sus discretizaciones.

Con base en lo anterior, se decide realizar el análisis numérico a una bomba centrífuga de flujo mixto comercial. La meta del presente trabajo es construir la curva característica y el comportamiento de la eficiencia, teniendo presente la inflación en la discretización del volumen de control para capturar el efecto que genera la viscosidad en las paredes, a través del análisis CPD en el *software* ANSYS. Para validar el método numérico, se comparan los resultados obtenidos con la curva característica otorgada por el fabricante.

Metodología

El estudio de la bomba centrífuga de flujo mixto se llevó a cabo en el *software* ANSYS 19.2. Para el análisis CFD, se tomó como base un dispositivo comercial de la empresa Kirloskar Brothers Ltd. Con ello, se buscó generar la curva característica. Los datos otorgados por el fabricante son: diámetro de succión de 175 mm y descarga de 236 mm, constituido por seis álabes, y la velocidad específica N_s es de 93,75. En la tabla 1, se muestran los valores respecto al punto BEP.

Tabla 1. Datos obtenidos de la bomba con respecto al punto BEP

Datos	Valor	Unidades
Caudal	364	m ³ /h
Altura	8,36	m
Eficiencia	83	%
Velocidad angular	1450	RPM

Fuente: [7]

En la figura 1, se muestra el perfil hidráulico del impulsor considerando el punto BEP, con el fin de generar el volumen de control del impulsor. Como se observa, la línea discontinua roja se refiere al eje de rotación del impulsor. Las flechas de color azul muestran la trayectoria del fluido, yendo desde la tubería de succión hasta la voluta. Al caracterizarse como flujo mixto, hay una inclinación en el extremo del álabes, que a diferencia del flujo radial (0°) y axial (90°), varía entre 1° y 89°. La inclinación para la bomba evaluada es de 20°.

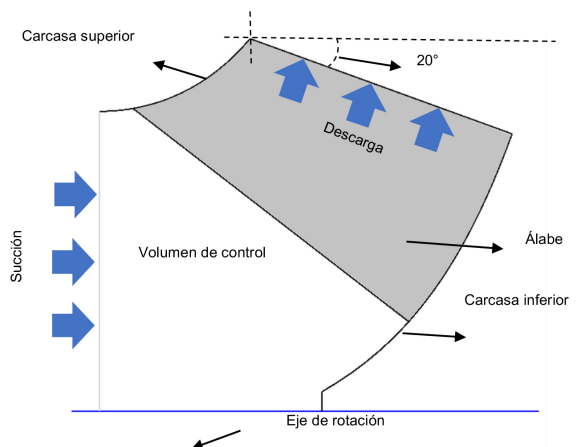


Figura 1. Perfil hidráulico del impulsor

Fuente: elaboración propia

Se generó la geometría del volumen del control de la voluta con base en el punto BEP. Luego, se ensamblaron ambos componentes en el módulo de modelado SpaceClaim, con el fin de que ambos elementos concordaran entre sí, evitando que una superficie se superpusiera a la otra; fue necesario modificar la forma de la bomba, pero conservando

sus dimensiones. En la figura 2, se observa el ensamble del impulsor y la voluta (a) con una vista en corte que muestra más de cerca la alineación de ambos elementos (b). Con el acercamiento generado en (b), se muestra el volumen de control del impulsor y la voluta, la interfaz e incluso la base de uno de los álabes.

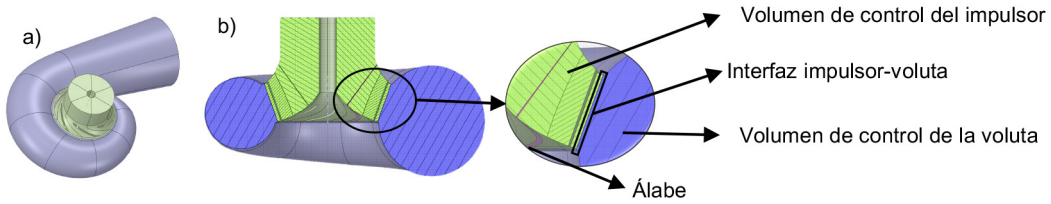


Figura 2. Acople del volumen de control del impulsor y de la voluta

Fuente: elaboración propia

A través del módulo Meshing, se generó la malla para los dos componentes. Fue necesario refinar ambos elementos, debido a que en dichas zonas ocurren fenómenos viscosos cercanos a las paredes que son difíciles de predecir por el *software*. Para ello, se discretizó el volumen de control y se parametrizaron las capas límites a lo largo de las zonas que tienen contacto con el fluido. Para calcular el valor de la primera capa de inflación, se utilizó la ecuación (1) [8].

$$\Delta y_1 = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot U_T}$$

De la ecuación 1, se considera la viscosidad μ y la densidad del agua ρ a una temperatura de 25°C. Por su parte, y^+ se obtuvo mediante una simulación, sin considerar el refinamiento previo. Finalmente, la velocidad de fricción U_T se calcula al considerar el número de Reynolds. La tabla 2 muestra los valores para el cálculo de la capa de inflación para el refinamiento de las paredes.

Tabla 2. Datos para el cálculo de la capa de inflación

Datos	Valor	Unidades
y^+	75	No aplica
Δy_1	2,03E-4	m
Número de capas	10	No aplica
Factor de crecimiento	20	%
Posición capa 10	1,05E-3	m

Fuente: elaboración propia

La cantidad de elementos en la malla para el impulsor es de 440 823 y en la voluta es de 1 916 619, dando un total de 2 357 442. La configuración realizada en el módulo CFX para la simulación fue la siguiente: dominio estático para la voluta y rotativo para el impulsor; el modelo de turbulencia utilizado fue Shear Stress Transport; análisis en estado estacionario; presión en la succión y descarga de 0 atm; la variable de análisis en la entrada es presión total y en la salida es flujo másico; el tipo de interfase utilizada fue Frozen Rotor; rugosidad del material de construcción de la bomba es de 0,36 mm [9]. Posteriormente, se varió el flujo másico del sistema, con el fin de obtener las alturas necesarias para reconstruir la curva característica de la bomba. Se configuró un valor residual de 1E-4 y un máximo de 10 000 interacciones, verificando que la variable de control (cabeza de altura) se estabilizara.

Resultados

La figura 3 presenta los resultados obtenidos mediante la simulación y se comparan con los datos experimentales. En esta, se observan dos grupos de curvas: cabeza de altura (azul) y la eficiencia (rojo) con respecto al caudal. Las curvas que tiene la figura de círculos se generaron mediante los valores experimentales de la bomba, mientras que las curvas que contienen las cruces (x) son datos de simulación. En ambos casos, la tendencia de las curvas generadas

por medio de los valores simulados es igual a su semejante numérica, donde el error en el punto BEP es del 9%.

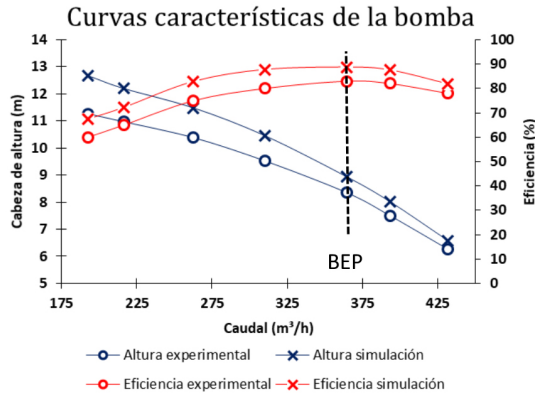


Figura 3. Curvas características para los valores experimentales y simulación

Fuente: elaboración propia

El error entre lo numérico y lo experimental puede ser debido a factores que no se consideraron (mallado, modelo de turbulencia, interfaz e incluso vorticidad) en la simulación, por lo que las curvas numéricas estuvieron por encima de las experimentales.

Conclusiones

Los valores experimentales del fabricante Kirloskar Brothers Ltd. con respecto a los simulados en el software ANSYS 19.2 son acordes a lo esperado. Por eso fue posible validar la simulación de cabeza de altura versus caudal y la curva de eficiencia.

Se comprobó que el análisis CFD presenta resultados muy acordes con la realidad; y además se tiene la posibilidad de observar los contornos de presión y velocidad en el impulsor que, en un equipo físico, es complejo. Con ello, es posible ahorrar en costos y tiempo en pruebas experimentales.

Se logró constatar que la verificación de los datos numéricos de cabeza de altura versus caudal y eficiencia genera una curva aproximada a la experimental, debido a que no se consideran la totalidad de las pérdidas fluidodinámicas.

Referencias

- [1] S. S. Yang, S. Derakhshan y F. Y. Kong, "Theoretical, Numerical and Experimental Prediction of Pump as Turbine Performance", *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 507-513, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.002>
- [2] X. Su, S. Huang, G. Qiu y G. Ou, "Flow Performance Analysis on Shutoff Condition in Centrifugal Pump based on CFD Simulation", pp. 014 (5.)-014 (5.), 2015. doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1142>
- [3] K. Patel y N. Ramakrishnan, "CFD Analysis of Mixed Flow Impeller", *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 03, n.º 15, pp. 601-607, 2015.
- [4] Y. Sha y L. Hou, "Performance Test and Analysis of Submersible Axial Flow Pump based on CFD", pp. 51-57, 2012.
- [5] S. Rajendran y K. Purushothaman, "Analysis of a Centrifugal Pump Impeller using ANSYS-CFX", *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 1, n.º 3, pp. 3-8, 2012.
- [6] R. S. Muttalli, S. Agrawal y H. Warudkar, "CFD Simulation of Centrifugal Pump Impeller Using ANSYS-CFX", *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 03, n.º 08, pp. 15553-15561, 2014.
- [7] Kirloskar Brothers Limited, "Pump Data". [En línea]. Available: <https://bit.ly/2N74EeH>. [Consultado: 13-feb-2019].
- [8] LEAP CFD Team, "Tips & Tricks: Estimating the First Cell Height for correct Y+?". [En línea], 2013 Available: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-cfd-estimate-first-cell-height/>. [Consultado: 15-jul-2019].
- [9] Universidad de Cádiz, "Rugosidad absoluta de materiales". [En línea], 2018. Available: <https://elaborate.uca.es/sistemas-del-buque-tabla-de-rugosidad-absoluta-de-materiales/>. [Consultado: 18-jul-2019].

Construction of power coefficient curves for hydrokinetic turbines of horizontal axis by CFD

Juan Diego Betancur Gómez

Instituto Tecnológico
Metropolitano
Universidad de Antioquia
juanbetancur134613@correo.itm.
edu.co

Abstract

The generation of electrical energy using only the movement of water has gained importance in recent years due to its low environmental and social impact [1]. Some of the most used turbines for the extraction of energy by these means are the horizontal axis hydrokinetics [2]; being an emerging technology, more studies are required to improve the understanding and functioning of these devices [3]. In this context, the hydrodynamic study to obtain the characteristic curves of the turbines is fundamental. This article presents the hydrodynamic analysis for three horizontal axis tri-blade hydrokinetic turbine rotors that were previously designed with commercial profiles (NACA 4412 and NREL S802). These geometries were exported to the ANSYS® program where two turbine control volumes were built, which were discretized until the mesh independence was achieved, in order to guarantee that the results of the simulation do not depend on the discretization of the control volume. The computational fluid dynamics (CFD) was used to observe the behavior of the fluid by varying the speed of rotation of the turbines from 0.1 rad/s to 40 rad/s, obtaining power coefficient from 0.390 to 0.435. In addition, it is evident that for the same conditions the rotor designed with the NREL S802 profile presents better performance than built with the NACA 4412.

Keywords: Hydraulic turbine, hydrokinetic energy, renewable energy, theory BEM, turbomachinery.

Introduction

Environmental and energy problems worldwide have forced researchers to seek sustainable energy solutions. They have found renewable alternatives such as wind, sun and water to generate clean and environmental-friendly energy. The energy available from water resources is the largest and cheapest of the world [1]. Large hydroelectric dams have been criticized because they require infrastructure that causes damage to the environment and ecosystems [4]. Accordingly, small hydroelectric plants have become one of the most economical and environment-friendly sources of energy generation in rural areas [5]. There are two techniques to extract energy from water, by hydrostatic and hydrokinetic. Hydrostatic methods use turbomachinery to extract the potential energy from the pressure head [6]. Hydrokinetic methods use the kinetic energy of channels, tides, oceans and rivers to generate energy using turbo machinery.

Hydrokinetic turbines are an emerging technology and they have gained strength and recognition because they provide a low-cost energy solution with low environmental impact [7]. This technology is still under development and it is in the research stage [8]. The number of studies of hydrodynamic characteristics is limited, and more research is needed [1]. The optimal use of water is very important for this type of turbines due to the low density of electricity generation.

There are studies focusing on the improvement of the efficiency and operation of hydrokinetic turbines using different aerodynamic profiles and changes in curvature and thickness [9], [10]. Several numerical and experimental investigations have been carried out to evaluate and improve the performance of hydrokinetic turbines [11], [12]. Several authors have studied different hydrodynamic profiles [13], [14]. However, the studies presented have different flows, sizes and hydro profiles and consequently, the power coefficient changes. The present study focused on the hydrodynamic analysis of three rotors by CFD. Each rotor was previously designed with different profiles (NACA 4412 and NREL S802). The objective was to analyze the fluid speed and pressure near the turbine and to construct the coefficient power (C_p) v. TSR (Tip Speed Ratio) curve of each rotor. There are no reports available of power coefficient curves for the rotors with the parameters presented in this study.

Methodology

The rotors presented in figure 1 were obtained from a previous study. Methodology BEM (Blade Element Momentum) was used in the design. The rotor built with the NACA 4412 profile (from now on NACA 4412) is similar to the rotor built with the NREL S802 profile (from now on NREL S802). These rotors were used for the simulation. A third part of the complete rotor was simulated to save computational resources, as shown in figure 1.

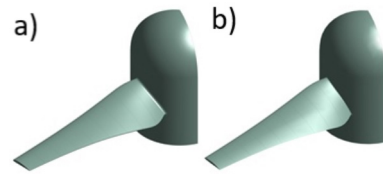


Figure 1. Rotors a) NACA 4412 b) NREL S802

Source: The authors.

Figure 2 shows the control volume created for the simulation. The largest control volume contains a rotating flow (small control volume). The turbine is located into the rotating flow. However, the turbine is not a solid body and the analysis is performed using the behavior of the fluid. Both control volumes are meshed. Proximity and curvature were used to densify the region surrounding the blade and the rotor, because this zone is where the phenomenology generated by the torque is produced. After the size of elements was reduced to have a minimum size of 0.008 m per element, this increased the number of elements up to 1,000,000. The metric parameters of the mesh were the maximum orthogonal quality of 0.7 and for the minimum skewness 0.3 both values are in the acceptability range indicated in ANSYS manual. This is the first mesh, but not the definitive one, since a grid independence study will be carried out later on.

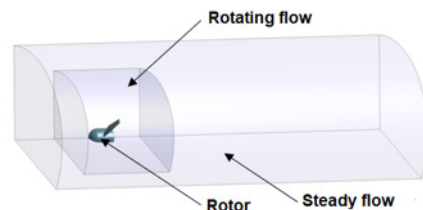


Figure 2. Control volume with rotor for simulation

Source: The authors.

Boundary condition of the fluids is shown in figure 3. The fluid inlet is in the green zone and the outlet in the red zone. Interfaces were used on the flat faces of the control volume and were defined as symmetric. The value or the form in which each of the regions was configured is reported in table 1.

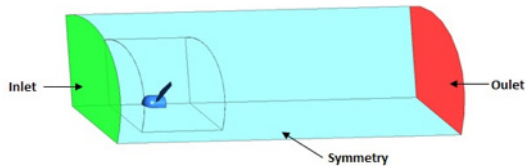


Figure 3. Boundary conditions of the system

Source: The authors.

Simulation was configured as transient with a time of 4 s and with an adaptive time step that varies between 0.01 s and 0.00001 s.

After concluding the configuration of the simulation, torque on the surface of the blade was selected as the output variable. When the first result was obtained, the torque was parameterized to continue with the mesh independence study.

Mesh independence studies guarantee the independence of results with respect to the number of elements and the characteristics of the mesh. The mesh is composed of tetrads from 300,000 to 30,000,000 elements. These studies consisted in observing the behavior of torque when the number of elements of the mesh is increased. The mesh is independent when torque variation is less than 3% compared to the densest mesh (relative error). Thus, the chosen mesh does not increase the error of the results and guarantee economy of computing resources.

Table 1. Configuration and boundary conditions of the study

Parameter	Value
Inlet	Normal speed
Outlet	Opening
Wall	No-slip
Symmetry (interface)	Periodic rotational
Type of calculation	Transient
Type of fluid	Water to 25 °C
Turbulence model	sst
Inlet speed	1,4 m/s
Rotation speed	0,1-40 rad/s

Source: The authors.

A mesh of 3.79 million elements was chosen for NACA 4412 rotor since it meets the mesh independence parameters with the least amount of elements to save computational resources. For NREL S802, a mesh of 3.79 million elements was chosen. It should be noted that all the chosen meshes comply with the parameters of orthogonality and skewness required for mesh to be acceptable in terms of quality.

With the selected meshes, the study of power coefficient against TSR was parameterized. The angular velocity varied from 0.1 rad/s to 40 rad/s to obtain power characteristic curves of each rotor. In addition, planes were created in different sections of the blade to obtain velocity and pressure profiles at those points for each of the rotors.

Results

Figure 4 shows the power coefficient results from the simulation of the NACA 4412 and NREL S802 rotors for different TSRs. In the image, one can see two curves in the form of a parabola corresponding to the numerical power coefficient of each rotors, and the straight line corresponds to the maximum power coefficient obtained by means of the BEM methodology without taking into account the losses. One can observe the maximum numerical power coefficient is close to the maximum C_p without losses. These results validate the simulation model as they approach the data obtained with the BEM methodology, which is a validated methodology with experimental results and offers high reliability. On the other hand, the maximum of the two functions is between $TSR = 3$ and $TSR = 4$, this coincides with the design TSR which is 3.5 for the NACA 4412, 3.6 for the NREL S802. To be more precise, a trend line of type 5 polynomial was created. The equation was obtained to calculate the local maximum. For NACA 4412 the $TSR = 3.9$ is the optimal value at which this rotor must operate to extract the maximum energy from the water. This is associated with a power coefficient of 0.396 for the NACA. The TSR for the NREL S802 is 3.9, which is associated with a power coefficient of 0.392.

The NACA 4412 rotor has a calculated power with the simulation values of 106.6 W, while the NREL S802 has a power of 105.6 W. Values are similar to those calculated numerically with the BEM methodology without losses that were 119.6 W and 120.1 W, respectively.

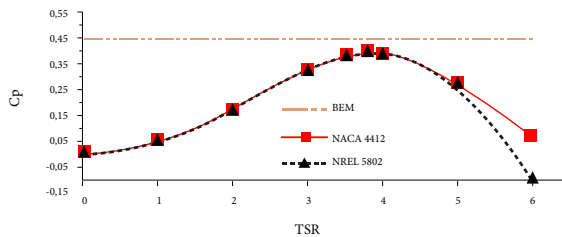


Figure 4. Comparison of power coefficient curves against tsr for the rotor naca 4412 and nrel S802

Source: The authors.

Conclusions

The high speeds must be produced in the lower part of the blade, and the lower ones, in the upper part, in order to generate the pressures to drive the rotor. In addition, a laminar fluid will have higher power coefficients.

To obtain the proper performance of the rotor, the relative angle between the fluid and the blade must be optimal, thus high pressure regions appear in the intrados and low pressures in the extrados, since this phenomenon will generate the torque.

Although two rotors presented similar phenomenology, the differences can be seen in the power coefficient. The rotor with the highest power coefficient was the NACA, followed by the NREL. The power in the axis of each one of the rotors according to the coefficient of power found is 106,6 W and 105,6 W, respectively.

References

- [1] M. I. Yuce and A. Muratoglu, "Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 72-82, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>
- [2] L. I. Lago, F. L. Ponta and L. Chen, "Advances and Trends in Hydrokinetic Turbine Systems," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, no. 4, pp. 287-296, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.004>
- [3] D. Kumar and S. Sarkar, "A Review on the Technology, Performance, Design Optimization, Reliability, Techno-economics and Environmental Impacts of Hydrokinetic Energy Conversion Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 796-813, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.247>
- [4] T. Hoq, U. A. Nawshad, N. Islam, K. Syfullah and R. Rahman, "Micro Hydro Power : Promising Solution for Off-grid Renewable Energy Source," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 2, no. 12, pp. 2-6, 2011.
- [5] A. Woodruff, "An Economic Assessment of Renewable Energy Options for Rural Electrification in Pacific Island Countries," *Pacific Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency*, February 2007.
- [6] M. J. Khan, M. T. Iqbal and J. E. Quaicoe, "River Current Energy Conversion Systems: Progress, Prospects and Challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 8, pp. 2177-2193, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.04.016>
- [7] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal and J. E. Quaicoe, "Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal Applications: A Technology Status Review," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823-1835, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- [8] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, "Status of Micro-hydrokinetic River Technology in Rural Applications: A Review of Literature," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625-633, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.066>
- [9] P. Liu, G. Yu, X. Zhu and Z. Du, "Unsteady Aerodynamic Prediction for Dynamic Stall of Wind Turbine Airfoils with the Reduced Order Modeling," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 402-409, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.066>
- [10] X. Li, K. Yang, J. Bai and J. Xu, "A New Optimization Approach to Improve the Overall Performance of Thick Wind Turbine Airfoils," *Energy*, vol. 116, pp. 202-213, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.108>
- [11] T. Yavuz et al., "Performance Analysis of the Airfoil-slat Arrangements for Hydro and Wind Turbine Applications," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 414-421, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.049>
- [12] J. N. Goundar, M. R. Ahmed and Y. H. Lee, "Numerical and Experimental Studies on Hydrofoils for Marine Current Turbines," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 173-179, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.048>
- [13] S. J. Kim, P. M. Singh, B. S. Hyun, Y. H. Lee and Y. Do Choi, "A Study on the Floating Bridge Type Horizontal Axis Tidal Current Turbine for Energy Independent Islands in Korea," *Renew. Energy*, vol. 112, pp. 35-43, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.025>
- [14] W. J. Zhu, W. Z. Shen and J. N. Sørensen, "Integrated Airfoil and Blade Design Method for Large Wind Turbines," *Renew. Energy*, vol. 70, pp. 172-183, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.057>

Optimización del rendimiento de una turbina Michell Banki utilizando algoritmos PSO Y BHO

Andrés Julián Pérez Rodríguez
Jorge Andrés Sierra Del Río
Diego Andrés Hincapié Zuluaga

Instituto Tecnológico
Metropolitano
andresperez219964@correo.itm.
edu.co

Resumen

La energía hidroeléctrica a pequeña escala presenta grandes ventajas con respecto a otros mecanismos de recolección de energía por su bajo impacto ambiental. Para la implementación de pequeñas hidroeléctricas, únicamente se hacen necesarias unas condiciones de sitio, de caudal y de cabeza adecuadas para cada turbina. La turbina Michell Banki es una turbina de flujo cruzado que tiene un rango de funcionamiento en unas condiciones de sitio intermedias con respecto a otras turbinas, y con eficiencia poco sensible al cambio de caudal. Se han realizado numerosos estudios sobre la mejora de la eficiencia y la potencia de salida de la turbina Michell Banki variando tanto sus parámetros geométricos como de operación. El objetivo de este estudio es optimizar la potencia de salida de la turbina Michell Banki por medio de la variación de los ángulos de ataque y ángulo de entrada del álabe utilizando los métodos metaheurísticos PSO y BHO. El estudio determinó un resultado óptimo de la potencia de salida con el algoritmo de PSO de $0,1925 V_{in}^3 R \lambda_{max} \rho$ y concluye que el algoritmo de PSO se adecuó mejor al problema de la potencia de salida de la turbina que el algoritmo BHO.

Palabras clave: energía hidroeléctrica, flujo cruzado, métodos metaheurísticos, optimización.

Introducción

La energía hidroeléctrica comprende la mayor parte de la energía renovable a nivel mundial, y los mecanismos de generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala son una solución ventajosa para el abastecimiento de energía en zonas no interconectadas, debido a que estas no presentan altos impactos ambientales [1]. Sin embargo, gran parte del potencial hidráulico no es utilizado [2], debido a que los mecanismos de generación hidroeléctrica requieren condiciones de sitio como caudal (Q) y cabeza (H) para un rendimiento óptimo según el tipo de turbina, por eso se hacen necesarios distintos tipos de turbinas para abarcar diversas zonas.

La turbina Michell Banki (TMB) es una turbina de flujo cruzado compuesta por un inyector, un rodete, una válvula guía y una carcasa, como se muestra en la figura 1a. Esta turbina cuenta con unas condiciones de sitio intermedias en comparación con otras turbinas, como se muestra en la figura 1b, y tiene una eficiencia casi invariable con los cambios de sus condiciones de caudal [3].

Diversos estudios sobre la TMB han sido realizados en el intento de mejorar su eficiencia y su potencia de salida por medio de la variación de sus parámetros de operación y sus parámetros geométricos, como variaciones en su relación de la velocidad de entrada del agua y la velocidad rotacional de la turbina [6]. También, análisis de la influencia del número de álabes [7], estudios del perfil de los álabes [8] y estudios que demuestran la incidencia de la geometría del inyector de la turbina en su eficiencia [9], entre otros; además de análisis teóricos que definen la eficiencia de la turbina como un parámetro que se puede dar en función del ángulo de ataque del agua (α) y el ángulo externo del álabes (β) [10], y presentando ecuaciones que pueden ser optimizadas [11].

Los ángulos α y β , que se muestran en la figura 3 como α_1 y β_1 , han presentado una relevancia significativa en la eficiencia de la turbina, debido a que estos ángulos definen los triángulos de velocidades que se muestran en la figura 3; y de la misma manera,

pueden presentar una incidencia en la potencia de salida de la turbina, sabiendo que el caudal puede variar con el ángulo α .

El objetivo de esta investigación es determinar la potencia de salida óptima de la TMB por medio de la variación de sus ángulos α y β , utilizando los algoritmos de optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) y de agujero negro (BHO) para comparar sus resultados.

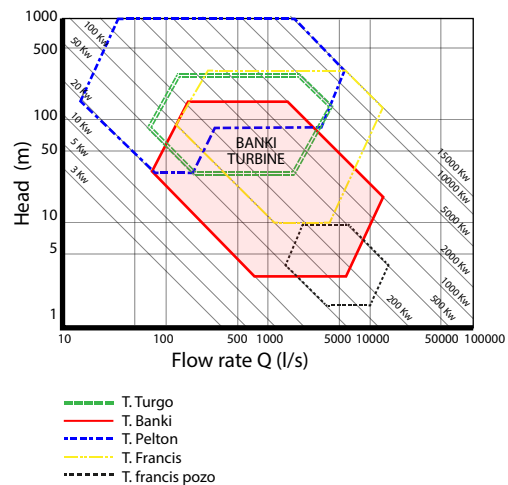
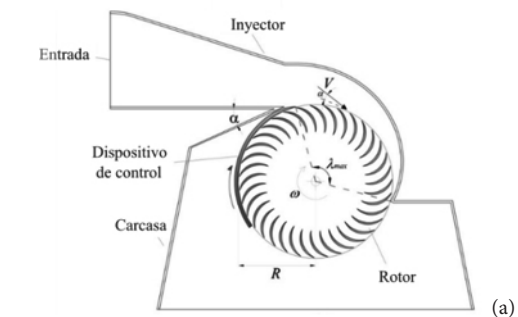


Figura 1. (a) Turbina Michell Banki; (b) condiciones de operación de diferentes turbinas.

Fuente: [4] y [5]

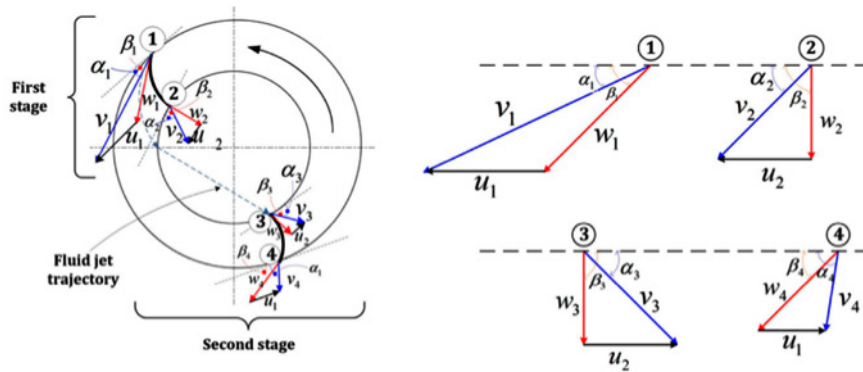


Figura 3. Ángulos de ataque de los álabes que definen los triángulos de velocidad.

Fuente: [12]

Del estudio de Michael A. Chávez [10] se extrae la ecuación de la eficiencia de la TMB en términos de los ángulos α y β . Esta formulación matemática puede predecir la potencia de salida de TMB de la siguiente manera:

$$\eta = 4\varphi^2 \frac{\sin(\alpha) \cos(\beta) \sin(\alpha - \beta)}{\sin^2(\beta)} \quad (1)$$

$$Q = V_{in} A \sin \alpha \quad (2)$$

$$P_{out} = 2V_{in}^3 R \lambda_{max} \rho \frac{\sin^2(\alpha) \cos(\beta) \sin(\beta - \alpha)}{\sin^2(\beta)} \quad (3)$$

Donde η es la eficiencia de la turbina, φ es un coeficiente de pérdida (que para este estudio se asume igual a 1), P_{out} es la potencia de salida de la turbina, V_{in} es la rapidez de entrada del agua, R es la rapidez de la turbina hasta la parte externa del álabes, ρ es la densidad del agua, A es el área por la cual el agua entra a la turbina y Q es el caudal.

La ecuación (3) puede ser optimizada utilizando un método de optimización continuo para determinar los ángulos con los que conseguiría la mejor potencia de salida.

Entre los métodos de optimización más frecuentes en la literatura se encuentra el algoritmo pso, del cual surgen otros métodos de optimización que pueden útiles para la resolución de este mismo problema y de otros. Este trabajo propone el algoritmo BHO para el desarrollo del estudio.

El algoritmo BHO es un algoritmo de optimización metaheurístico basado en la interacción

dinámica entre las estrellas y los agujeros negros en el universo [13].

Como información preliminar para la descripción del método, se define un agujero negro como un cuerpo supermasivo con una atracción de gravitación tan alta que ni la luz puede escapar de un radio determinado a su alrededor (conocido como radio de Schwarzschild u horizonte de eventos).

Con base en lo anterior, al igual que en el método pso, en el algoritmo BHO se plantean de forma aleatoria varios puntos en el hiperespacio estudiado, los cuales se entienden como estrellas, y la estrella cuyas coordenadas representen el mejor punto del dominio es entendida como el agujero negro; después de esto, las estrellas se mueven hacia el agujero negro de la siguiente manera:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + rand \cdot (X_{BH} - X_i(t)) \quad (4)$$

Donde X_i es el vector de posición de la estrella i en la iteración t , $rand$ es un número aleatorio en el intervalo de $[0,1]$ y X_{BH} es la posición del agujero negro.

Si la estrella atraviesa el radio de Schwarzschild del agujero negro, modelado matemáticamente para este algoritmo por la ecuación (5), la estrella se reemplaza por otra estrella que es creada de forma aleatoria en el espacio de solución.

$$R_s = \frac{f(X_i)}{\sum_{i=1}^n f(X_i)} \quad (5)$$

Donde n es el número de estrellas, $f(X_i)$ es la función objetivo evaluada en X_i y R_s es el radio de Schwarzschild del agujero negro.

Una vez cumplido el criterio de convergencia planteado por el problema o una vez haya terminado la cantidad máxima de iteraciones, el punto óptimo del algoritmo es X_{BH} de la última iteración.

Los algoritmos BHO y PSO se van a utilizar para optimizar el rendimiento de la TMB y comparar los resultados de tiempo y precisión del algoritmo

Metodología

Para el desarrollo de la optimización, se utilizó un computador con procesador Intel® Core™ i7 5500U, 8 gigabytes de RAM y sistema operativo Windows 10. Los algoritmos PSO y BHO se desarrollan y ejecutan en el *software* Matlab R2019a®. La función objetivo que se plantea es la ecuación (3), tomando como variables los ángulos α y β , y dejando los demás términos constantes. Para la optimización, se plantea el dominio trazado por los siguientes límites (tabla 1).

Tabla 1. Límites inferiores y superiores en los que se ejecuta el algoritmo

Parámetro	Primer límite inferior (°)	Primer límite superior (°)	Segundo límite inferior (°)	Segundo límite superior (°)
α	15	24	0	90
β	15	45	0	90

Fuente: elaboración propia

El primer dominio de α es planteado debido a que es un espacio definido por los límites en los cuales se han realizado antes experimentos para este ángulo según la literatura. El segundo dominio es planteado en el espacio de solución más grande que conserve las cualidades de la TMB.

En el PSO, se plantea un coeficiente de aprendizaje global de 0,5, particular de 1,9 y de inercia de 0,4; el número de partículas y de iteraciones son variados en ambos métodos. La precisión del algoritmo de optimización se determina implementando el algoritmo con varias condiciones de partículas e iteraciones, 100 veces en cada caso.

Resultados

Los métodos de optimización presentaron potencias de salida diferentes para los dos casos de dominios planteados: un resultado de potencia de salida máxima de $0,1697V_{in}^3 R\lambda_{max}\rho$ para el primer dominio y uno de $0,1925V_{in}^3 R\lambda_{max}\rho$ para el segundo dominio.

La derivada parcial de la función con respecto al ángulo β es aproximadamente igual a 0, lo cual valida el resultado de la optimización.

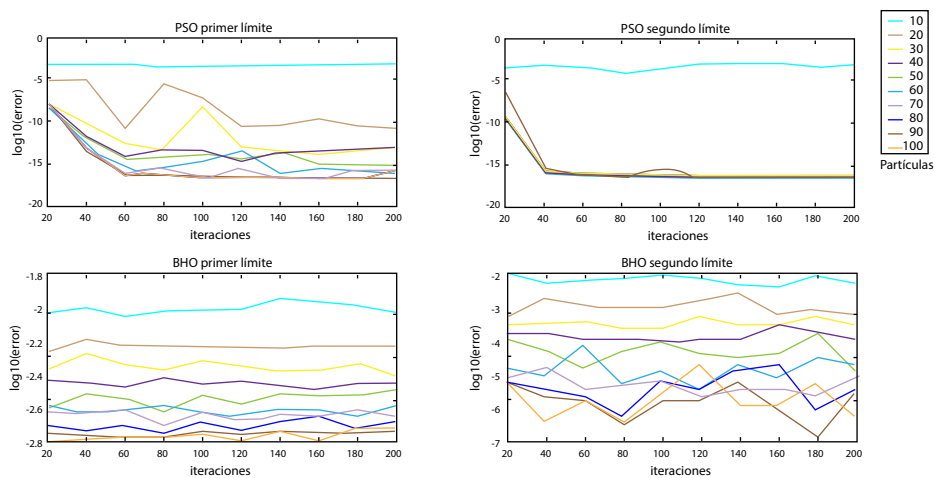


Figura 4. Logaritmo del error en algoritmo PSO y BHO

Fuente: elaboración propia

En la figura 4, se presenta el logaritmo en base 10 del error del resultado del procedimiento de optimización en cada caso.

Se observa que el PSO entregó mejores resultados que el BHO en ambos dominios; así mismo, el algoritmo agujero negro presentó una mejor respuesta en el segundo dominio planteado, debido a que este encontraba un punto óptimo en una zona distinta al borde del dominio.

Conclusiones

Se logró optimizar la eficiencia de la turbina Michell Banki utilizando el método de optimización por enjambre de partículas y el algoritmo agujero negro. El algoritmo PSO presentó los mejores resultados de precisión, con un promedio de errores por el orden de $10^{-16} V_{in}^3 R\lambda_{max} \rho$ en el resultado de la potencia de salida.

Se determinó que el algoritmo BHO no es adecuado para resolver el problema, debido a que el resultado de la potencia de salida óptima de la turbina se encuentra en el límite del dominio planteado.

Referencias

- [1] E. E. Gaona, C. L. Trujillo y J. A. Guacaneme, "Rural Microgrids and its Potential Application in Colombia", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 125-137, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.176>
- [2] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), "World Small Hydropower Development Report". [En línea], 2016. Disponible: <https://www.unido.org/our-focus/safeguarding-environment-clean-energy-access-productive-use-renewable-energy-focus-areas-small-hydro-power/world-small-hydropower-development-report>
- [3] M. Sinagra, V. Sammartano, C. Aricò, A. Collura y T. Tucciarelli, "Cross-Flow Turbine Design for Variable Operating Conditions", *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1539-1548, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.170>
- [4] V. Sammartano, P. Filianoti, M. Sinagra, T. Tucciarelli, G. Scelba y G. Morreale, "Coupled Hydraulic and Electronic Regulation for Banki Turbines", *Procedia Eng.*, vol. 162, pp. 419-425, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.083>
- [5] J. I. Gómez Gómez, E. A. Palacio Higuaita y C. A. Paredes Gutiérrez, "La turbina Michell-Banki y su presencia en Colombia", *Av. Recur. Hidraul.*, vol. 17, pp. 33-42. [En línea], 2008. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9287>
- [6] V. Sammartano, G. Morreale, M. Sinagra, T. Tucciarelli y R. Fellow, "Numerical and Experimental Investigation of a Cross-flow Water Turbine", *J. Hydraul. Res.*, vol. 54, n.º 3, pp. 321-331, 2016. <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1147500>
- [7] Y. Castañeda Ceballos, M. Cardona Valencia, D. Hincapié-Zuluaga y J. A. Sierra Del Río, "Influence of the Number of Blades in the Power Generated by a Michell Banki Turbine", *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, n.º 4. [En línea], 2017. Disponible: Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/327473923-Influence_of_the_Number_of_Blades_in_the_Power_Generated_by_a_Michell_Banki_Turbine
- [8] D. Adanta, A. I. Siswantara y A. P. Prakoso, "Performance Comparison of NACA 6509 and 6712 on Pico Hydro Type Cross-Flow Turbine by Numerical Method", *J. Adv. Res. Fluid Mec. Therm. Sci.* [En línea], mayo, 2018. Disponible: Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/327792773-Performance_Comparison_of_NACA_6509_and_6712_on_Pico_Hydro_Type_Cross-Flow_Turbine_by_Numerical_Method
- [9] R. C. Adhikari y D. H. Wood, "A New Nozzle Design Methodology for High Efficiency Crossflow Hydro Turbines", *Energy Sustain. Dev.*, vol. 41, pp. 139-148, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.004>
- [10] M. A. Chávez, "Un estudio de la turbina de flujo cruzado (efecto del ángulo de ataque y el ángulo de entrada del álabe y relación de diámetros en la eficiencia hidráulica)", *Siendo, Ciencia para el Desarrollo*, vol. 15, n.º 2. [En línea], 2013. Disponible: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/496>
- [11] L. Jasa, I. P. Ardana, A. Priyadi y M. H. Purnomo, "Investigate Curvature Angle of the Blade of Banki's Water Turbine Model for improving Efficiency by means Particle Swarm Optimization", *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, n.º 1, pp. 170-177. [En línea], 2017. Disponible: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/5194>
- [12] E. T. Woldemariam, H. G. Lemuy G. G. Wang, "CFD-Driven Valve Shape Optimization for Performance Improvement of a Micro Cross-Flow Turbine". [En línea], enero 2018. Disponible: Research Gate https://www.researchgate.net/publication/322639914-CFD-Driven_Valve_Shape_Optimization_for_Performance_Improvement_of_a_Micro_Cross-Flow_Turbine
- [13] S. Kumar, D. Datta y S. K. Singh, "Black Hole Algorithm and Its Applications", *Comput. Intell. Appl. Model. Control*, vol. 575. [En línea], 2015. Disponible: Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/281786410-Black_Hole_Algorithm_and_Its_Applications

Evaluación de la gasificación de residuos maderables en zonas rurales para la generación de un *syngas* requerido como combustible dentro del proceso del beneficio seco del café

Carlos Esteban Aristizábal

José Luís González Manosalva

Alfredo Trespacios Carrasquilla

Laima Klemas

Carlos Roberto Arango Gutiérrez

Instituto Tecnológico
Metropolitano de Medellín
carlosaristizabal207157@correo.
itm.edu.co

Resumen

En este trabajo se realiza el análisis típico del proceso de beneficio seco para una finca cafetera promedio. Se asume el uso y la implementación del carbón, la leña y el *syngas* (gas de síntesis) como combustible para evaluar los indicadores económicos y ambientales de cada caso de implementación, con base en pronósticos desarrollados con la ayuda de algoritmos computacionales, información histórica sectorial, datos de la variación del precio de venta de combustibles y otra información relevante, necesaria para el desarrollo de la metodología propuesta. Incluir este valor del impuesto al carbono presenta dentro del flujo de caja analizado mayores beneficios económicos para el *syngas* que para aquellos sistemas que usan los combustibles tradicionales.

Palabras clave: beneficio del café, energía, estufas, reconversión, *syngas*.

Introducción

Uno de los subprocesos de acondicionamiento de los granos de café, posterior al beneficio húmedo de estos, es el secado. Consiste en retirarle la mayor cantidad de agua o humedad hasta que se alcance entre 10 y 12% (base húmeda) según las características fisicoquímicas establecidas por la norma vigente para la comercialización del café tipo pergamino [1]. El secado de café se lleva a cabo por el uso directo de la energía o radiación solar, la cual puede aprovecharse en patios de cemento, carros o cajones, elbas o casa elbas y secadores tipo marquesina [1], [2]. El proceso tarda entre siete y quince días dependiendo de las condiciones climatológicas de la zona, y solo se recomienda para fincas cafeteras con producciones inferiores a 500 arrobas por año [1]. Además, la eficiencia de aprovechamiento de la energía solar es aproximadamente entre 7 y 13%, debido a que solo una fracción pequeña de los granos es la que capta esta energía y a que la superficie del café tipo pergamino no tiene la propiedad de ser altamente captadora de radiación solar [2].

Existe un recurso renovable con alta disponibilidad en áreas rurales, el cual consta de los residuos maderables generados durante el proceso de renovación de cafetales por el método del “soqueo”; con un promedio de diecisiete toneladas de madera seca producida por hectárea sembrada [3]. Esta madera es utilizada solo en procesos de cocción de alimentos y calentamiento, lo cual desaprovecha el potencial energético de la biomasa, y genera

emisiones contaminantes y nocivas para la salud [4]-[6]. Sin embargo, existen procesos termoquímicos más eficientes, como la gasificación, en la cual la biomasa es transformada en un gas combustible conocido como *syngas* [3].

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es mostrar la comparación entre diferentes tipos de combustibles (GLP, carbón mineral y *syngas*) y determinar cuál de ellos es más adecuado para generar el calor necesario y satisfacer la demanda térmica del proceso de secado de granos de café, considerando un análisis técnico, económico y ambiental (ATEA) y siguiendo la metodología propuesta.

Metodología

Se toma como punto de partida la información suministrada por el Sistema de Información Cafetera (SICA) de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, a fin de obtener un estimado de la producción de café por finca. Posteriormente, se calculan los balances de materia y energía, y el flujo de caja libre del proyecto, teniendo en cuenta un tamaño promedio de finca cafetera de cinco hectáreas, según reportes de la Federación Nacional de Cafeteros y el SICA, que a su vez representan el 94% del total de las fincas del país. En esa finca promedio, cerca de 1,4 hectáreas se encuentran dedicadas al cultivo de café [7], [8]. En la figura 1, se muestra un esquema de la metodología empleada.

Información primaria

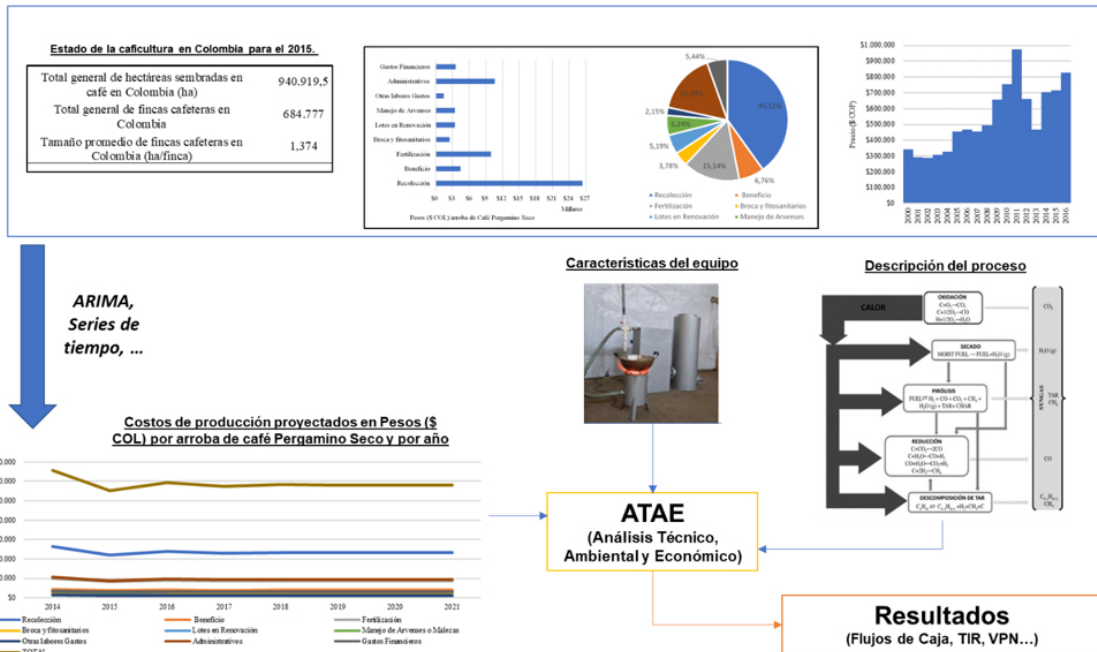


Figura 1. Esquema metodológico
Fuente: elaboración propia

Según la figura 1, se inicia el proceso con la captura y obtención de información primaria relevante para el desarrollo del ATAE. Esta puede ser: tamaño promedio de una finca cafetera, estado actual de la caficultura, costos de producción, etc.

Los históricos de la información primaria son la materia prima del modelo ARIMA, el cual determina los históricos de variables clave en un atea, tales como proyección en el tiempo de los costos de producción y consumo de combustible, entre otros. Estos históricos son utilizados para determinar los flujos de caja, el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), considerando las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) impositivas en términos económicos por la causación del impuesto al carbono, debido a la quema de combustibles y a la generación de toneladas de CO_2 equivalente. Este supuesto está amparado en la Reforma Tributaria 1819 del 2016 y en el título 5 del Decreto 926 del 2017.

Mediante la comparación de estos indicadores para los diferentes tipos de combustible y tecnología,

se decide con cuál de estos es más adecuado generar la energía térmica requerida para el secado mecánico del café.

Cabe resaltar que para el análisis económico se integran todos los elementos enunciados, con el fin de construir los flujos de caja y de esta forma comparar los distintos escenarios basados en el VPN del proyecto, tomando una tasa del 7,69%, la cual es un valor promedio para las inversiones en el sector de agricultura [9]. Para el sector de energías renovables, la tasa de retorno esperada está entre 10 y 15% [10].

Resultados

A continuación, en la figura 2 se ilustra el flujo de caja del proyecto para los combustibles estudiados y se muestra el VPN dependiendo de la tasa de descuento. En este caso, se señala 5% y el rango entre 10 y 15% por las razones ya mencionadas en la metodología.

1. Energía, agua y medio ambiente

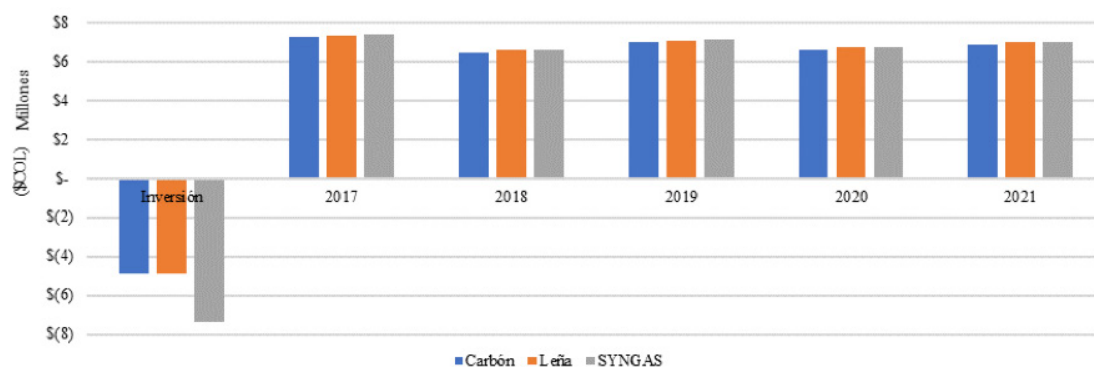


Figura 2. Flujo de caja para los combustibles analizados (2017-2021)

Fuente: elaboración propia

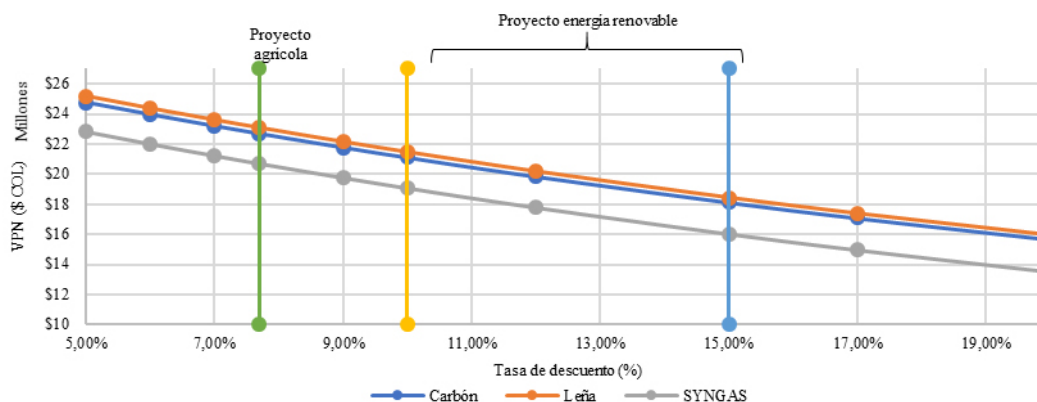


Figura 3. Valor presente neto versus tasa de descuento para los combustibles analizados

Fuente: elaboración propia

En la tabla 1, se muestran los resultados para las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, el valor del impuesto al carbono y los indicadores de evaluación económica utilizados: el VPN evaluado como proyecto agrícola, la TIR y el tiempo de retorno de la inversión.

Tabla 1. Resultados de los indicadores estudiados para los distintos tipos de combustible durante el proyecto (2017-2021)

Combustible	Emisiones (kgCO_2)	Valor impuesto al carbono (COP)	Valor presente neto (COP)	Impuesto al carbono por arroba (COP)	TIR (%)
Carbón	9925,87	148 888	22 704 668,04	156,73	142
Leña	10 299,55	154 493	23 097 591,25	162,63	144
Syngas	165,04	498	20 710 453,43	0,52	92

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Las fincas cafeteras trabajan convencionalmente con carbón mineral, con GLP o con leña para desarrollar los procesos térmicos de beneficio. En este documento, se compara el funcionamiento de una secadora de café que utiliza como combustible estos recursos y el *syngas*, desde un punto de vista técnico, económico y ambiental, y en el que se monetizaron las afectaciones ambientales.

Este análisis arrojó como resultado que la leña y el carbón tienen mayor viabilidad económica. Sin embargo, la diferencia entre los indicadores económicos es poca, a pesar de que con el *syngas* se necesita una inversión inicial por el cambio tecnológico. Además, los beneficios indirectos con esta tecnología abordarían temas en salud humana, calidad del aire y cambio climático.

Adicionalmente, el hecho de incluir el valor del impuesto al carbono dentro del flujo de caja y como información de entrada para el ATEA trae mayores beneficios económicos para el *syngas* que para aquellos sistemas que usan los combustibles tradicionales, dado que el uso del carbón implica un aumento en los costos de producción de COP 156,73 por arroba producida, para la leña sería de COP 162,63 y para el *syngas* sería de COP 0,52. Este aumento en los costos corresponde a que la leña y el carbón son más contaminantes y generadores de GEI.

Referencias

- [1] Cenicafé, “Beneficio del café II: secado del café pergamino”, *Cartilla Cafetera*, n.º 21, pp. 170-190. [En línea], 2004. Disponible: [www.cenicafe.org › cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf](http://www.cenicafe.org/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf)
- [2] J. A. Hernández y D. M. Tovar, “Aprovechamiento de la energía calórica de estufas campesinas para el secado del café”, *Cenicafé*, vol. 57, n.º 2, pp. 88-99. [En línea], 2007. Disponible: [www.cenicafe.org › publications › arc057\(02\)088-099](http://www.cenicafe.org/publications/arc057(02)088-099)
- [3] C. A. García, Á. Peña, R. Betancourt y C. A. Cardona, “Energetic and Environmental Assessment of Thermochemical and Biochemical Ways for Producing Energy from Agricultural Solid Residues: Coffee Cut-Stems Case”, *J. Environ. Manage.*, vol. 216, pp. 160-168, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.029>
- [4] C. A. García, A. Gómez, R. Betancourt y C. A. Cardona, “Environmental Comparison of Thermochemical and Biochemical Ways for Producing Energy from Agricultural Solid Residues: Coffee Cut-stems Case”, presentado en *4th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Limasol, Chipre, 2016.
- [5] A. Cortés e I. Ridley, “Efectos de la combustión a leña en la calidad del aire intradomiciliario de la ciudad de Temuco como caso de estudio”, *Rev. Invi*, vol. 28, n.º 78 pp. 257-271. [En línea], 2013. Disponible: <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/812/1102>
- [6] C. L. Mendoza Martinez *et al.*, “Characterization of Residual Biomasses from the Coffee Production Chain and Assessment the Potential for Energy Purposes”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 120, no. November 2018, pp. 68-76, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.003>
- [7] Federación Nacional de Cafeteros, “Sistema de información Cafetera - SICA”, *Federación Nacional de cafeteros*. [En línea], 2015. Disponible: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/servicios_para_el_cafetero/sistema_de_informacion_sica-1/. [Consultado: 12-abril-2017].
- [8] A. Lozano Karanauskas, “Relaciones de tamaño, producción y trabajo en las fincas cafeteras colombianas”, tesis de maestría, Facultad de Economía, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia [En línea], 2007. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9652>
- [9] Damodaran, “Betas by Sector (us)”. [En línea], 2018. Disponible: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html. [Consultado: 24-mayo-2018].
- [10] M. Chandel, G. D. Agrawal, S. Mathur y A. Mathur, “Techno-economic Analysis of Solar Photovoltaic Power Plant for Garment Zone of Jaipur City”, *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 2, pp. 1-7, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.10.002>

Aplicación de ingeniería inversa para la reconstrucción del modelo CAD de la voluta de una bomba centrífuga de flujo radial

Oscar D. Monsalve-Cifuentes

Diego Penagos-Vásquez

Jorge Andrés Sierra-Del Río

Jonathan Graciano-Uribe

Instituto Tecnológico
Metropolitano
oscarmonsalve204998@correo.itm.
edu.co

Resumen

Este trabajo describe el proceso de ingeniería inversa para la reconstrucción del modelo CAD a través del método de escaneo 3D de una bomba centrífuga de flujo radial. La ingeniería inversa permite manufacturar a un bajo costo-tiempo, y su objetivo e importancia son postulados con el fin de enfatizar su impacto social en aspectos como la industria, la agricultura y la calidad de vida. El estudio numérico de bombas operando como turbinas permitiría impactar socialmente las zonas no interconectadas de Colombia por medio de la generación eléctrica alternativa. El presente estudio es posible realizarlo gracias al pre y al posprocesamiento para la reconstrucción de datos primitivos realizando una validación estadística. Se concluyó que la validación está dentro de los rangos de estándares internacionales (IEC 60193) y por tanto la reconstrucción CAD es apta para estudios numéricos.

Palabras clave: ajuste geométrico primitivo, ingeniería inversa, malla 3D, reconstrucción CAD.

Introducción

La ingeniería inversa aplicada a la reconstrucción de modelos CAD (Computer Aided Design) ha sido un foco importante de estudio en los últimos años debido al desarrollo de la tecnología de escaneo 3D y al alza de sus aplicaciones potenciales. Este procedimiento define la similitud del modelo CAD con la comparación del objeto original caracterizado por el escáner 3D [1]. La aplicación de la ingeniería inversa reduce el costo y el tiempo de manufactura [2]-[4], hecho que se puede aprovechar tanto en procesos cotidianos como en procesos industriales.

Este trabajo quiere enfatizar en el impacto social que posee el fomento de la ingeniería inversa. En primer lugar, en la obtención y utilización de equipos de bombeo para sus diferentes aplicaciones en la industria, agricultura y calidad de vida; por ejemplo, en sistemas de riego, bombeo y arietes, con lo que representa una oportunidad factible para satisfacer aquellas necesidades que requieren este tipo de equipos y repuestos. En segundo lugar, las bombas operadas como turbina (Pump as Turbine “PAT”) también tienen un impacto social importante con su aporte de la generación de energía eléctrica alternativa, barata y viable [5] para aquellas poblaciones no pertenecientes a la red de interconexión nacional colombiana. Para realizar estos estudios, se debe iniciar con el modelamiento tridimensional de la turbomáquina.

En el estado del arte consultado, se encuentran varios trabajos que destacan el uso de superficies libres para el levantamiento del CAD, en especial en cámaras de espiral (volutas) [6]; además, estos modelos tridimensionales han servido como insumo para estudios fluidodinámicos [7].

El objetivo principal del trabajo es reconstruir y validar el modelo CAD, con base en el estándar internacional IEC 60193 (International Electrotechnical Commission) [8], de una bomba centrífuga de flujo radial utilizando el método de ingeniería inversa de escaneo 3D [9]. La malla resultante de este escaneo es posprocesada en el módulo de modelado SpaceClaim del *software* ANSYS® 2019 R2 para luego ser validada en el *software* Geomagic® Control X™.

Metodología

La aplicación de ingeniería inversa en la reconstrucción del modelo CAD de una bomba de flujo radial está constituida por el pre y el posprocesamiento de información, en los cuales se siguió una serie de pasos:

Preprocesamiento

- Puesta a punto y escaneo 3D de la bomba.

Posprocesamiento

- Comprobación de la mejor trayectoria meridional, dibujo de superficies libres y solidificación de voluta.
- Extrusión de geometría simple.

Validación

- Contrastar el sólido tridimensional con el escaneo 3D.
- Análisis de datos estadísticos.

Puesta a punto y escaneo 3D de la bomba

Previo al inicio del proceso de ingeniería inversa para la bomba, se realizó una limpieza general debido a su estado. Esta limpieza fue importante hacerla, porque las suciedades que estaban presentes en la bomba pudieron haber generado irregularidades y superficies erróneas en la malla del escaneo 3D. Para lograr un buen escaneo con el equipo disponible (Sense™ 3D Scanner), se adecuó el espacio para posicionar la bomba, que fue ubicada sobre unas bases metálicas y un fondo blanco para un mejor mapeo del escáner (figura 1a). En la figura 1b, se aprecia la malla seleccionada de dieciséis escaneos realizados.

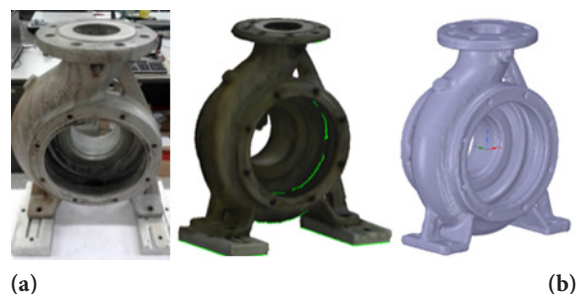


Figura 1. (a) Montaje de la bomba para el escaneo 3D; (b) malla 3D posescaneo utilizada

Fuente: elaboración propia

Comprobación de la mejor sección meridional y método de dibujo de superficies libres y solidificación de voluta

Los dieciséis archivos del mapeo 3D (.stl) generados por el escáner se importaron al módulo de modelado SpaceClaim del *software* ANSYS® 2019 R2 para analizar la mejor sección meridional y construir el modelo CAD. El proceso de modelado se inició con la selección de la mejor sección meridional, debido a que representa el perfil hidráulico de la voluta y a que las superficies libres se basaron en la trayectoria de dicha sección meridional. A partir de la sección meridional seleccionada (figura 2a), se comenzó a trazar planos perpendiculares a través de la trayectoria que representa el perfil hidráulico de la voluta para crear el boceto de las superficies libres (figura 2b). La unión

contigua de las superficies libres da lugar a la geometría de la voluta (figura 2c), en la que la selección para su unión juega un rol importante en la precisión interna y externa del sólido con respecto a la trayectoria meridional (figura 2d).

Extrusión de geometría simple

Las figuras 2e, 2f y 2g evidencian la metodología por medio de la cual se generó la geometría restante de la voluta a partir de figuras geométricas elementales (cilindros y paralelepípedos, entre otros), siendo modeladas con base en la malla 3D. Así mismo, se tomaron medidas directamente de la voluta para tenerlas presentes en el modelado cad, debido a que la malla 3D en algunos puntos no representa fielmente la topología de la bomba.

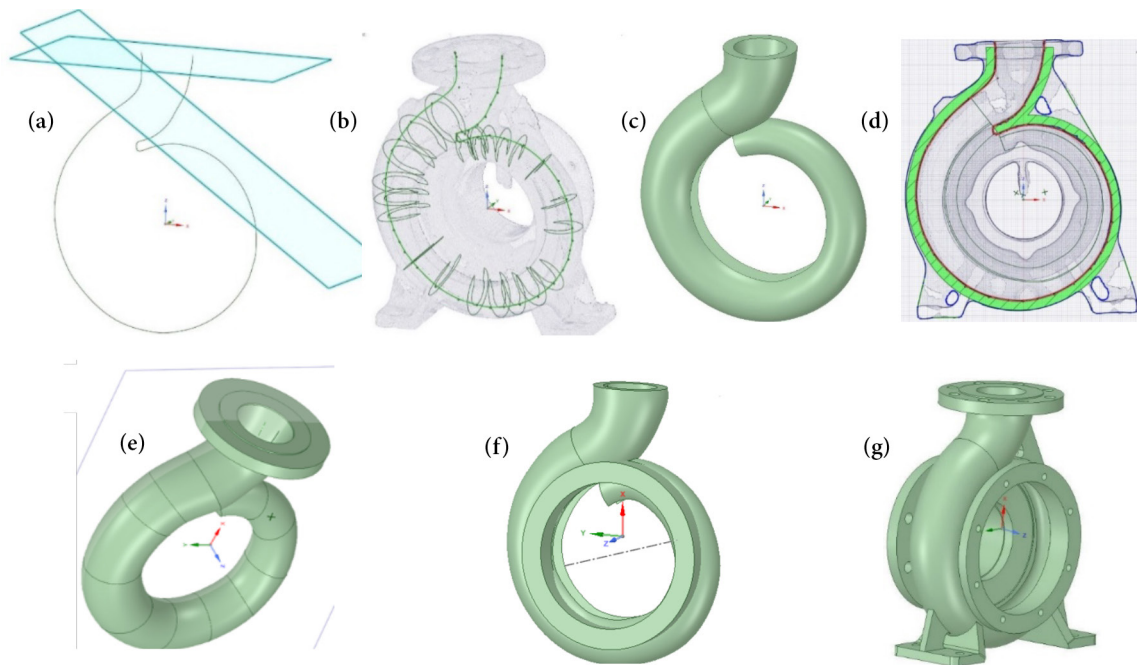


Figura 2. Proceso de reconstrucción del modelo CAD

Fuente: elaboración propia

Resultados

Posterior al modelado 3D de la bomba, es necesario comprobar su validez para determinar si la reconstrucción geométrica es apta para estudios de simulación numérica. Los errores estadísticos

que relacionan el mapeo 3D con el modelo reconstruido son generados principalmente por inexactitudes y superficies irregulares inherentes a la malla 3D. Propiamente causados en el proceso de escaneo, estos errores de preprocesamiento son directamente proporcionales a la calidad del equipo de escaneo 3D,

debido a criterios como capturas por minuto (FPP) y resolución.

A fin de validar el modelo 3D, se utilizó el *software* de inspección y metrología Geomagic® Control X™ para determinar estadísticamente las medidas de las desviaciones de la malla con el modelo CAD

de la voluta. La zona de interés a analizar es la sección meridional, debido a que por esta zona transita el flujo de control (figura 5a). A su vez, se trazaron diez secciones meridionales equidistantes (5 mm), con el fin de calcular el error general para determinar su validez (figura 5b).

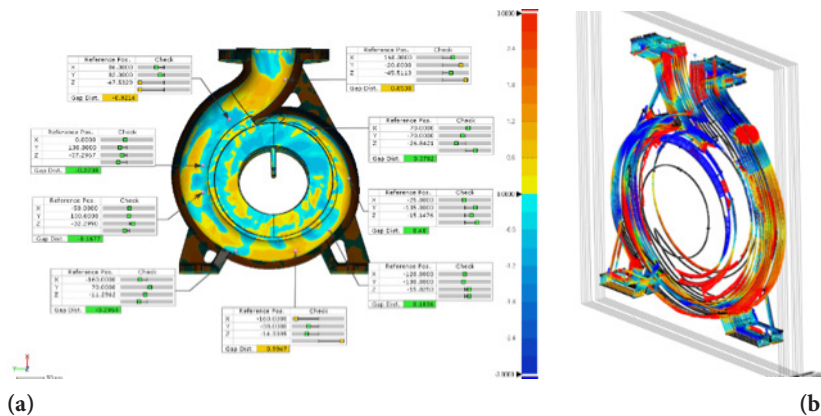


Figura 5. (a) Verificación de la sección transversal meridional; (b) secciones meridionales equidistantes

Fuente: elaboración propia

La tabla 1 presenta diez secciones meridionales respecto a variables estadísticas; las variables “Mín. (mm)” y “Máx. (mm)” hacen referencia al error relativo entre la malla y el CAD, su valor mínimo y máximo, respectivamente. La variable “Avg.” representa el promedio de todos los puntos

en la sección meridional, mientras que la media cuadrática (RMS) y la desviación estándar (Std. Dev.) representan los valores estadísticos representativos para determinar el error de la voluta, encontrando un valor promedio de las secciones meridionales de 2,9 mm.

Tabla 1. Medidas estadísticas de las secciones transversales equidistantes al plano meridional

Variables	Secciones meridionales										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Mín. (mm)	-11,638	-9,363	-14,693	-13,036	-10,504	-11,820	-9,432	-13,223	-10,730	-11,919	-11,636
Máx. (mm)	6,374	12,51	14,986	13,340	10,603	11,828	7,501	13,213	11,113	11,879	11,335
Avg.	-0,659	0,611	-0,370	0,416	0,183	0,481	-0,155	0,025	0,514	0,021	0,107
RMS	2,741	2,970	4,203	3,153	2,605	2,668	2,513	3,045	2,812	2,614	2,932
Std. Dev.	2,661	2,907	4,187	3,125	2,599	2,624	2,508	3,045	2,765	2,614	2,903
In Tool. (%)	32,294	10,361	9,428	10,121	12,667	9,978	8,668	7,318	7,905	9,377	11,812
Out Tool. (%)	67,706	89,639	90,572	89,879	87,333	90,022	91,33	92,682	92,095	90,624	88,188

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Los promedios de la medida cuadrática (RMS) y la desviación estándar (Std. Dev.) arrojan un error de 1,16%, lo cual no representa un desfase significativo en la geometría de la voluta con respecto al diámetro de la succión de esta. Adicionalmente, el promedio de 2,9 mm está por debajo de la norma IEC 60193 [8] de 3 mm. Por lo anterior, se determina la validez del modelo tridimensional de la voluta y se concluye que la reconstrucción geométrica es apta para estudios de simulación numérica.

Referencias

- [1] F. Buonomici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini y Y. Volpe, "Reverse Engineering of Mechanical Parts: A Template-based Approach", *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, n.º 2, pp. 145-159, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.009>
- [2] E. Bagci, "Reverse Engineering Applications for Recovery of Broken or Worn Parts and Re-manufacturing: Three Case Studies", *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, n.º 6, pp. 407-418, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.07.003>
- [3] M. Dúbravčík y Š. Kender, "Application of Reverse Engineering Techniques in Mechanics System Services", *Procedia Eng.*, vol. 48, pp. 96-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.491>
- [4] M. Betancur y F. Botero, "Ingeniería inversa aplicada: metodología y aplicaciones industriales", tesis de especialización, Escuela de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia. [En línea], 2011. Disponible: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/9080>
- [5] D. Adu, J. Zhang, M. Jieyun, S. N. Asomani y M. Osman Koranteng, "Numerical Investigation of Transient Vortices and Turbulent Flow Behaviour in Centrifugal Pump Operating in Reverse Mode as Turbine", *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, n.º 2, pp. 356-364, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.12.002>
- [6] J. Graciano-Urbe, "Metodología computacional para el diseño de cámaras en espiral de turbinas hidráulicas", trabajo de grado, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. [En línea], 2015. Disponible: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/143>
- [7] M. Mojaddam y A. Hajilouy-Benisi, "Experimental and Numerical Flow Field Investigation through Two Types of Radial Flow Compressor Volute", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 78, pp. 137-146, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.05.016>
- [8] International Electrotechnical Commission, "IEC 60193:1999 Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-turbines — Model Acceptance Tests", pp. 1-569. [En línea], 1999. Disponible: <https://webstore.iec.ch/publication/1014>
- [9] R. Bénére, G. Subsol, G. Gesquière, F. Le Breton y W. Puech, "A Comprehensive Process of Reverse Engineering from 3D Meshes to CAD Models", *Computer-Aided Design*, vol. 45, n.º 11, pp. 1382-1393, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.06.004>

2. Materiales, procesos químicos, físicos y biotecnológicos

Estudio preliminar de la estabilidad y comportamiento térmico de dispersiones de grafeno en diésel

Santiago Rivera Ospina
Karen Paola Cacia Madero

Instituto Tecnológico
Metropolitano
santiagorivera255448@correo.itm.
edu.co

Resumen

La adición de nanopartículas en los combustibles se ha empleado con el fin de mejorar las emisiones contaminantes que afectan la salud humana y de mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna. No obstante, luego de la preparación de los nanofluidos aparecen algunos problemas en cuanto a estabilidad, dado que se evidencian algunas partículas sedimentadas y presencia de aglomerados. Para este trabajo, utilizamos nanopartículas de grafeno comerciales; se llevó a cabo dispersión a través de sonda ultrasónica en diésel comercial como fluido base para así formar nanofluidos diferentes en concentraciones (50 y 100 ppm) y surfactantes (SDBS, CTAB, PVP, Tritón X-100 y ácido oleico). Se estudió la estabilidad de los nanofluidos mediante inspección visual una semana después de la preparación para determinar la cantidad de nanopartículas dispersas en la dispersión. Luego, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para estudiar el comportamiento termodinámico de los nanofluidos. Finalmente, se observó una mejora en la estabilidad al añadir SDBS en los nanofluidos, y se presentaron cambios significativos en el retraso en la ignición y un aumento de la estabilidad térmica al añadir nanopartículas de grafeno en el diésel, lo que lleva a que se reduzcan las emisiones contaminantes en los motores.

Palabras clave: análisis termogravimétrico, diésel, emisiones contaminantes, estabilidad, grafeno.

Introducción

Los combustibles fósiles han sido durante muchos años la mayor fuente de energía para mover el mundo, como también uno de los causantes directos del calentamiento global [1]. Para mitigar los riesgos en la salud provocados por la contaminación y mejorar las emisiones causadas por estos combustibles, han surgido muchos estudios sobre el uso de nanopartículas como aditivos al diésel. De esta manera, investigadores han buscado nuevas alternativas para encontrar soluciones a las emisiones contaminantes y a su vez aumentar la eficiencia de los motores de combustión interna a través de la adición de nanopartículas a los combustibles [2]-[4]. Además, teniendo en cuenta los tiempos de almacenamiento del diésel antes de ser comercializados para el consumo, resulta la necesidad de estudiar a fondo la estabilidad de los nanofluidos [5].

En este trabajo, se evaluó la estabilidad de nanofluidos diésel-grafeno y se evaluó el comportamiento térmico de estas dispersiones a través de TGA.

Este estudio preliminar hace parte de la búsqueda de alternativas que permitan mejorar la eficiencia y la mitigación de emisiones contaminantes en motores de encendido por compresión.

Metodología

Preparación de nanofluidos

Los nanofluidos preparados fueron el producto de añadir nanopartículas de grafeno comercial en diésel comercial. El método de dispersión por vibración ultrasónica es un medio altamente efectivo para crear dispersiones de nanopartículas en un líquido base, teniendo además la capacidad de permanecer en suspensión durante varios días. En este trabajo, se llevó a cabo la dispersión usando una sonda ultrasónica Q500 Sonicator y con un tiempo efectivo de 45 minutos de sonicación. Se prepararon nanofluidos cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de nanofluidos

ID	Nanopartículas	Concentración (ppm)	Surfactante - CMC	Volumen preparado (ml)
6	Grafeno comercial	50	No	100
7	Grafeno comercial	50	SDBS - 1	100
8	Grafeno comercial	50	SDBS - 2	100
9	Grafeno comercial	50	CTAB - 1	100
10	Grafeno comercial	50	PVP - 1	100
11	Grafeno comercial	50	Tritón X100 - 1	100
12	Grafeno comercial	50	Ácido oleico - 1	100
14	SDBS	0,128 g	SDBS	100
17	Grafeno comercial	100	No	100

Fuente: elaboración propia

Estabilidad

La estabilidad se evaluó por inspección visual [6]-[8]. Las fotografías se tomaron durante varios días para evaluar cambios en el color inicial de las dispersiones y evidenciar sedimentación.

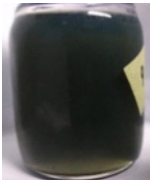
Análisis termogravimétrico (TGA)

Fue utilizado un equipo Discovery Q550, con una rampa de calentamiento de 10°C/min, iniciando la prueba desde temperatura ambiente hasta 800°C. Este análisis fue realizado con el fin de observar el comportamiento de la curva de pérdida de peso con respecto a la temperatura alcanzada por el nanofluido.

Resultados

Estabilidad

Tabla 2. Inspección visual día de preparación nanofluidos

Día preparación						
NF06	NF07	NF08	NF09	NF10	NF11	NF12
						

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Inspección visual pasados ocho días de la preparación de los nanofluidos

Día 8						
NF06	NF07	NF08	NF09	NF10	NF11	NF12
						

Fuente: elaboración propia

Análisis termogravimétrico (TGA)

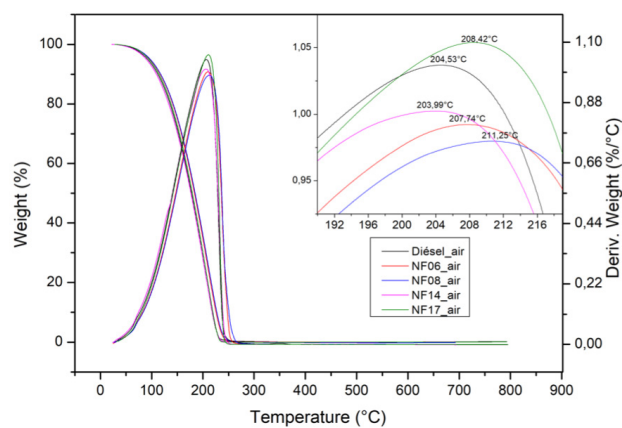


Figura 1. TGA de nanofluidos de base diésel con aditivos de nanopartículas de grafeno comercial y un nanofluido de base diésel con SDBS añadido

Fuente: elaboración propia

Algunos autores como S. Siraj [9] y Y. Lai *et al.* [10] encontraron que el diésel se evapora completamente a una temperatura de 253 °C y velocidad con un pico máximo de temperatura a 210 °C. En nuestro estudio, la temperatura en la cual el diésel se evapora completamente fue de 253,52 °C, mientras que el pico máximo de temperatura alcanzada fue de 204,53 °C para el diésel en atmósfera oxidante (aire).

Conclusiones

- En la inspección visual, se evidenció que el NF08 conserva mayor cantidad de partículas dispersas en la dispersión, debido a que pasados ocho días de la preparación se observaron más partículas dispersas con respecto a los demás nanofluidos.
- En esta prueba, se comprobó un retraso en la temperatura de ignición para el nanofluido compuesto por diésel y SDBS añadido (NF14) con respecto al diésel, mientras que se evidenció un aumento en la temperatura de ignición con la adición de nanopartículas de grafeno y un desplazamiento significativo en el aumento en la ignición para el nanofluido compuesto por nanopartículas de grafeno y SDBS añadido (NF08) con respecto al diésel.
- El tiempo de ignición más corto se presentó para NF17 en 13,58 °C con respecto al diésel de acuerdo con la amplitud del pico de la derivada, y la estabilidad térmica mejora con la adición de nanopartículas de grafeno, pues el NF08 presenta la temperatura de ignición 6,72 °C más alta que la del diésel.
- La reducción del tiempo en la ignición, el aumento en la estabilidad térmica y el aumento en la estabilidad de las dispersiones generadas por la adición de nanopartículas de grafeno pueden ser relacionados con las modificaciones en la eficiencia y las emisiones contaminantes en motores de encendido por compresión.

Referencias

- [1] H. Soukht Saraee, H. Taghavifar y S. Jafarmadar, "Experimental and Numerical Consideration of the Effect of CeO₂ Nanoparticles on Diesel Engine Performance and Exhaust Emission with the Aid of Artificial Neural Network", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 113, pp. 663-672, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermal-eng.2016.11.044>
- [2] K. Vinukumar, A. Azhagurajan, S. C. Vettivel, N. Vedaraman y A. Haiteer Lenin, "Biodiesel with nano additives from coconut shell for decreasing emissions in diesel engines", *Fuel*, vol. 222, pp. 180-184, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.129>
- [3] A. I. El-Seesy, A. K. Abdel-Rahman, M. Bady y S. Ookawara, "Performance, Combustion, and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled by Biodiesel-diesel Mixtures with Multi-walled Carbon Nanotubes Additives", *Energy Convers. Manag.*, vol. 135, pp. 373-393, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.090>
- [4] A. Prabu, "Nanoparticles as Additive in Biodiesel on the Working Characteristics of a DI Diesel Engine", *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, n.º 4, pp. 2343-2349, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.04.004>
- [5] M. E. M. Soudagar, N.-N. Nik-Ghazali, A. Kalam, I. A. Badruddin, N. R. Banapurmath y N. Akram, "The Effect of Nano-additives in Diesel-biodiesel Fuel Blends: A Comprehensive Review on Stability, Engine Performance and Emission Characteristics", *Energy Conversion and Management*, vol. 178, pp. 146-177, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.019>
- [6] K. Cacua, R. Buitrago-Sierra, B. Herrera, F. Chejne y E. Pabón, "Influence of Different Parameters and their Coupled Effects on the Stability of Alumina Nanofluids by a Fractional Factorial Design Approach", *Adv. Powder Technol.*, vol. 28, n.º 10, pp. 2581-2588, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.07.009>
- [7] J. Lee e I. Mudawar, "Assessment of the Effectiveness of Nanofluids for Single-phase and Two-phase Heat Transfer in Micro-channels", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, n.º 3-4, pp. 452-463, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.001>
- [8] E. Ettetfaghi *et al.*, "A Novel Bio-nano Emulsion Fuel based on Biodegradable Nanoparticles to Improve Diesel Engines Performance and Reduce Exhaust Emissions", *Renew. Energy*, vol. 125, pp. 64-72, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.086>
- [9] S. Siraj, "Effects of Thermal, Physical, and Chemical Properties of Biodiesel and Diesel Blends", *Am. J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 2, n.º 1, p. 24, 2017. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ajmie.20170201.14>
- [10] Y. Lai *et al.*, "The Thermogravimetric Analysis of Different Blends of Biodiesel of Rapeseed and Petrodiesel", *Biotechnology*, vol. 14, n.º 1, pp. 9-15, 2015. doi: <https://doi.org/10.3923/biotech.2015.9.15>

Biodigestión del POME como alternativa energética y ambiental en las extractoras de aceite de palma

Daniel Domínguez Carvajal
Ana Marcela Mosquera Mena
John Alejandro Ruiz
Carlos Peláez
Mariana Peñuela Vásquez

Universidad de Antioquia
daniel.dominguezc@udea.edu.co

Resumen

El POME (*palm oil mill effluent*) es un residuo del proceso de la extracción de aceite de palma. Para el año 2018, se generaron 4887000 toneladas de este residuo a nivel nacional; su alto contenido en materia orgánica (DQO promedio de 60000 mg O₂/L) lo convierte en un problema ambiental que debe ser atendido con urgencia. Para el POME procedente de Puerto Salgar (Colombia), se encontró una DQO de 69650 mg O₂/L y 31543 mg sólidos volátiles / L, lo que lo hace una materia prima con alto potencial metanogénico. En el proceso de biodigestión, se logró una producción promedio de 25,3 L_{biogás} / L_{POME} con una composición de 58,4% CH₄, 40,4% CO₂, 1,1% O₂ y 1156 ppm de H₂S, y una reducción de carga orgánica del 93%. Los resultados obtenidos, sumados a la alta disponibilidad de este residuo, hacen de este un sustrato adecuado para procesos de digestión anaerobia orientados a la generación de energía a partir de fuentes no convencionales.

Palabras clave: biogás, DQO, digestión anaerobia, POME, UASB.

Introducción

En el año 2018, en Colombia se registró una producción de 1,7 millones de toneladas de aceite de palma, lo que generó un residuo de 4,9 millones de toneladas de POME (*palm oil mill effluent*); es importante resaltar el incremento de la producción de aceite de palma en los últimos años, lo cual ha llevado a un aumento de 46,6% de generación de POME desde el año 2014 [1].

El aumento de la producción ha convertido el POME en un problema ambiental importante, debido a que presenta altos niveles de contaminación, pues es depositado en lagunas de oxidación que requieren grandes extensiones de tierra y largos tiempos de degradación en contacto directo con la atmósfera arrojando dióxido de carbono y metano, los cuales representan una gran parte de los gases de efecto invernadero [2]. En el presente trabajo, se expone la caracterización y el aprovechamiento del potencial energético del POME, un residuo proveniente principalmente de la etapa de esterilización y clarificado en el proceso de extracción de aceite de palma. Se estima que por cada tonelada de aceite crudo producido se obtienen en promedio tres toneladas de POME [3].

Sus características fisicoquímicas y su alta carga orgánica, representada principalmente en residuos lipídicos, hacen del POME un sustrato de gran interés para ser sometido a un proceso de digestión anaerobia como una forma de aprovechamiento energético. Esto con el fin de revertir el impacto negativo de estos residuos en las comunidades aledañas a las plantas de procesamiento del fruto y los daños causados al ecosistema acuático, disminuyendo la carga orgánica de estos efluentes para encontrar una aplicación agroindustrial de las corrientes obtenidas, generando así un valor agregado para el proceso.

Muchos autores presentan la digestión anaerobia como una alternativa promisoría para el tratamiento de los residuos de las plantas extractoras de aceite de palma. Pogaku *et al.* [4] alcanzaron una producción de biogás de 0,7825 litros por kilogramo de POME con una composición de 62,5% CH_4 , 37,5% CO_2 y trazas de H_2S [4]. Poh y Chong [5], en un reactor tipo UASB-HCPB, obtuvieron un biogás con 52% de metano y una remoción de 88% de DQO [6]. En el año 2011, Fang *et al.* alcanzaron un rendimiento de metano a partir de POME de 438 CH_4/g sv con una remoción de 90% en DQO [7].

En el presente trabajo, se realiza la caracterización y el aprovechamiento energético del POME, por medio de un proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás que pueda suplir demandas energéticas en las plantas de extracción de aceite de palma.

Metodología

Material: el POME es proveniente de una extractora ubicada en el departamento de Cundinamarca (Colombia).

Caracterización: se caracterizó el POME siguiendo los lineamientos del Standard Methods [8], realizando pruebas por triplicado de los factores más relevantes como sólidos totales (ST), sólidos volátiles (sv) y sólidos fijos (sf), DQO, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, pH y DBO.

Evaluación del POME como sustrato: el proceso se realiza en un reactor de flujo ascendente continuo (UASB) de segunda generación acoplado a un reactor secundario; el reactor secundario cumple la función de finalizar la degradación de materia orgánica que no se degradó en el UASB, el cual trabaja con un flujo diario de aproximadamente 3,96 L distribuido a lo largo de las 24 horas, este flujo contiene en promedio 2,03 L de POME. En la figura 1, se presenta un esquema del sistema que se utiliza para la degradación anaerobia del POME.

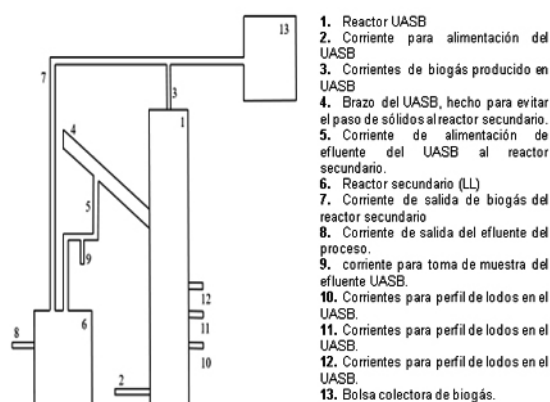


Figura 1. Diagrama del sistema de digestión anaerobia UASB

Fuente: elaboración propia

Se toman muestras semanalmente para llevar un control del sistema por medio de la cuantificación de los parámetros que se considera que pueden afectan

la producción de biogás de manera directa. Esta cuantificación se realiza principalmente en las corrientes 2, 8, 9 y 13 que se citan en la figura 1. La cuantificación de estas propiedades se rige según los estándares establecidos por el Standard Methods [8], siendo el método 2540 el utilizado para la determinación de los sólidos (totales, volátiles y fijos), el método 8000 para la determinación de DQO y mediciones de otras variables pH, y la relación ácidos grasos volátiles y alcalinidad se hace por el método de Kapp [7].

El análisis se lleva a cabo tomando 600 mL de muestra en la corriente 2, 8 y 9 que corresponde a la alimentación, lecho de lodos y UASB, respectivamente. De cada muestra se disponen 150 mL para el análisis de sólidos totales y volátiles, cada análisis se realiza por triplicado; cada muestra se seca en estufa a 105 °C por 24 horas para cuantificar sólidos totales y posteriormente en una mufla a 550 °C durante 1 hora para cuantificar sólidos volátiles.

Para DQO se toman 20 mL de muestra y se realiza el análisis por triplicado. Después de preparar las muestras, se agrega a los viales de DQO con micropipeta un volumen de 20 μ L y se ponen a reaccionar en un termorreactor por dos horas a 150 °C; luego de cumplirse el tiempo, se dejan reposar hasta llegar a temperatura ambiente y se mide la concentración en un colorímetro de la misma marca del termorreactor¹, el cual tiene como blanco un vial de DQO sin muestra.

Para la medición de pH, cuantificación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad, se necesitan alrededor de 125 mL de cada muestra, se centrifugan por diez minutos y el sobrenadante se titula con ácido sulfúrico 0,1N, este proceso se realiza por triplicado. Para el cálculo de ácidos grasos volátiles y alcalinidad, se hace uso del método Kapp [7].

Con los datos anteriores, se lleva el control de la producción de biogás que puede variar debido a inhibiciones del sistema como aumento en la relación ácidos grasos-alcalinidad. Al tener el reactor en funcionamiento, se mide la producción específica de biogás cuantificando por medio de un medidor de gas² y la cuantificación de la composición de este por medio de un equipo³, lo cual nos permite saber la proporción de metano, dióxido de carbono, oxígeno y sulfuro de hidrógeno que contiene el biogás.

- 1 Marca HACH.
- 2 Marca Premex.
- 3 Geotech Biogas 5000.

Resultados

La caracterización del POME se muestra en la tabla 1. Los resultados del monitoreo del reactor se presentan en las figuras 2, 3, 4, 5 y 6, en las que se expone principalmente el comportamiento de las diferentes variables como sv, DQO, ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad (ALK), y la producción de biogás durante el tiempo de monitoreo.

Tabla 1. Caracterización del POME

Parámetros	Promedio	Desviación estándar
ST (mg/L)	39 333	$\pm$ 4481
SV (mg/L)	31 236	$\pm$ 3249
SF (mg/L)	8097	$\pm$ 1360
DQO (mgO ₂ /L)	69 650	$\pm$ 1866
DBO (mgO ₂ /L)	8500	-
Carbono orgánico (g/L)	23,80	-
Nitrógeno orgánico (g/L)	1,33	-
Relación C/N	17,9	-
pH	3,9	$\pm$ 0,2

Fuente: elaboración propia

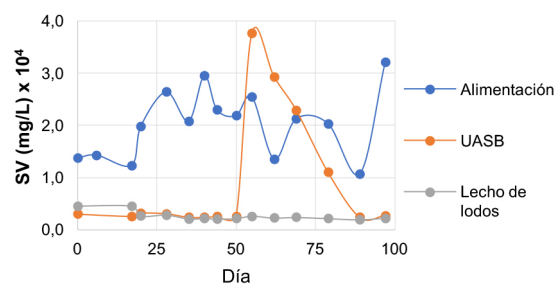


Figura 2. Comportamiento de sólidos volátiles en el reactor

Fuente: elaboración propia

En la figura 2, se observa un pico en el día 55, que representa un incremento en los sv en el UASB, como resultado de una sobrecarga en el reactor; sin embargo, la cantidad de sv en el lecho de lodos (reactor secundario) tiene valores que van con el comportamiento normal del reactor, lo que permite decir que esta etapa garantiza obtener una depuración promedio en los sv en todo el proceso al controlar las sobrecargas.

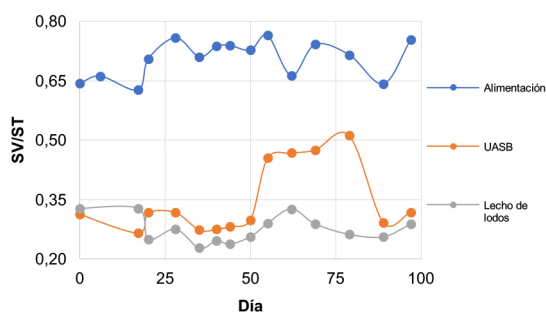


Figura 3. Relación de sólidos volátiles y sólidos totales durante tiempo de monitoreo del proceso

Fuente: elaboración propia

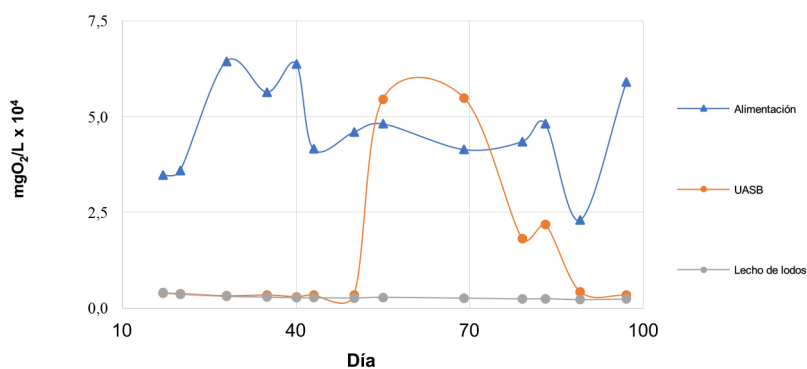


Figura 4. Demanda química de oxígeno del proceso durante tiempo de monitoreo del proceso

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la figura 4, se puede apreciar que la mayor depuración de materia orgánica se realiza en el UASB y que el reactor secundario es óptimo para controlar sobrecargas sin necesidad de detener el proceso cuando se presentan.

Se mantiene un control de los niveles de agv y alk para evitar sufrir inhibiciones en el sistema por el aumento de esta relación; se puede apreciar que pese a la sobrecarga sufrida el UASB, no se ve descompensado y tiende a estabilizarse.

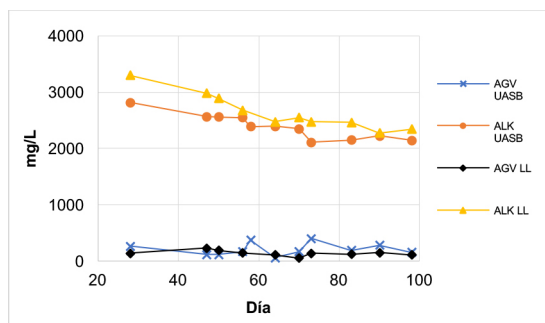


Figura 5. AGV y ALK durante el monitoreo del proceso tanto en el UASB como en el lecho de lodos

Fuente: elaboración propia

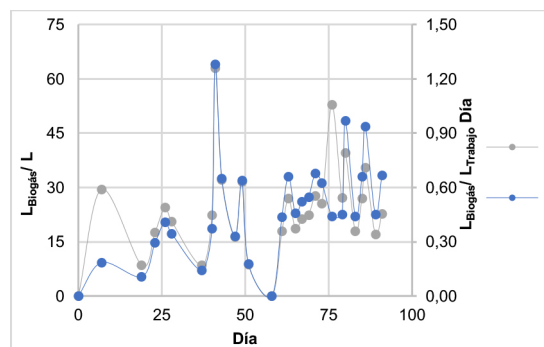


Figura 6. Producción de biogás. A: biogás / volumen de POME; B: producción específica (volumen biogás / volumen de trabajo por día)
Fuente: elaboración propia

La producción de biogás se ve afectada por el sistema que se empleó para su colecta, siendo modificado (día 40), y dando como resultado una mayor producción debido a que no se contaba con un depósito apropiado que permitiera la adecuada cuantificación de este.

Conclusiones

- A pesar de ser un experimento exploratorio, la biodigestión del POME produce un biogás con una cantidad de metano apreciable (58,4% CH₄, 40,4% CO₂, 1,2% O₂).
- Se logra una remoción de materia orgánica promedio de 93%, lo que indica que el proceso de digestión anaerobia es un buen proceso para disminuir su impacto ambiental.
- El uso de un reactor secundario garantiza el control de sobrecargas que pueda sufrir el sistema, en donde la cantidad de materia degradada en el UASB disminuye, pero al final del proceso se observa que la remoción se mantiene promedio a la que presenta el sistema cuando está estable.
- Los procesos de digestión anaerobia dan a residuos como el POME un valor energético agregado, y así contribuyen a la valorización de residuos orgánicos y revierten el impacto ambiental que muchos causan tras su disposición final al reducir su carga orgánica que se ve reflejada en la disminución de DQO y sólidos volátiles.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa Colombia Científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema Científico, contrato FP44842- 218-2018

Referencias

- [1] Fedepalma, “Evolución histórica anual de fruto procesado, el aceite de palma y palmito extraídos”. [En línea], 2014. Disponible: <http://sispaweb.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/produccion>
- [2] L. Y. Lang, “Treatability of Palm Oil Mill Effluent (POME) using Black Liquor in an Anaerobic Treatment Process”, tesis de maestría en ciencias, University Sains Malaysia, Malasia, 2007.
- [3] E. E. Narváez Guerrero y R. Peñafiel, “Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la extracción del aceite crudo de palma”, trabajo de grado, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, 2015.
- [4] R. Pogaku, K. Y. Yong y V. P. R. Veera Rao, “Production of Biogas from Palm Oil Mill Effluent”, en *Advances in Bioprocess Technology*. P. Ravindra, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 99-112.
- [5] P. E. Poh y M. F. Chong, “Upflow Anaerobic Sludge Blanket-hollow Centered Packed Bed (UASB-HCPB) Reactor for Thermophilic Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 67, pp. 231-242, 2014.
- [6] C. F. Sompong O-Thong, K. Boe e I. Angelidaki, “Comparison of UASB and EGSB Reactors Performance, for Treatment of Raw and Deoiled Palm Oil Mill Effluent (POME)”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, n.º 1-2, pp. 229-234, 2011.
- [7] H. Kapp, *Schlammfaulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86*. Munchen: Oldenbourg Verlag, 1984.
- [8] L. L. Bridgewater et al., Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

Obtención de biocarbón de aserrín de pino ciprés a partir de un pretratamiento de torrefacción e impacto en sus propiedades fisicoquímicas

Pedro Nel Alvarado Torres

Ricardo Antonio Mazo Restrepo

Fredy Esteban Jaramillo Ramírez

Instituto Tecnológico
Metropolitano
pedroalvarado@itm.edu.co

Resumen

La torrefacción es una alternativa de pretratamiento termoquímico a biomásas que consiste en someterlas a una atmósfera inerte a baja temperatura (200-300 °C), con el fin de obtener un material carbonoso con mejores propiedades fisicoquímicas y con potencial aplicación en dispositivos térmicos. En el presente estudio, se evaluaron el efecto de parámetros como la temperatura y el tiempo de residencia en un residuo de madera de pino ciprés (aserrín), a partir de la construcción de un reactor de torrefacción donde se recolectaron muestras para determinar sus propiedades fisicoquímicas, como son: poder calorífico, densidad a granel, fracciones sólida-líquida-gaseosa y morfología SEM-EDS. Se seleccionaron tres temperaturas (225 °C, 250 °C y 275 °C) y un tiempo de residencia bajo para abarcar varios rangos del proceso (ligero, medio y severo) y obtener biocarbonos. El biocarbón a 275 °C fue el que mejores resultados presentó asociado a un color superficial similar a un carbonizado; disminución de la densidad a granel producto de un efecto físico de poseer una superficie porosa en el material y aumento del poder calorífico hasta 18% en comparación con la biomasa sin tratar.

Palabras clave: biomasa, propiedades fisicoquímicas, reactor de torrefacción, temperatura y tiempo de residencia, torrefacción.

Introducción

En Colombia, se definió una meta nacional de desarrollo bajo en carbono, que corresponde a la reducción progresiva hasta el año 2030 de las emisiones nacionales de GEI de 20% (y hasta 30% condicionada) [1]. Para cumplir esta meta, el uso de la biomasa es esencial ya que el país cuenta con grandes cantidades de residuos de cultivos de gran importancia económica; por ejemplo, los residuos de cultivos transitorios como el arroz y el maíz, y de los cultivos permanentes como el banano, el plátano, el café, la caña de azúcar, la caña de panela y la palma de aceite, entre otros. En cuanto al sector maderero, se destacan los residuos industriales de los aserríos, los residuos forestales y la madera proveniente de cultivos energéticos [1].

Un tipo particular de biomasa lo constituye la madera, definida como un compuesto biopolímero que presenta las siguientes características: proviene de los árboles, es renovable y sostenible, es abundante en la tierra, tiene propiedades mecánicas y térmicas aceptables, es biodegradable, es biocompatible y es permisible a modificaciones químicas en su estructura. Por tanto, debido al interés de la sociedad por disminuir la dependencia al consumo de productos derivados de combustibles fósiles, el desarrollo de materiales biodegradables a base de madera es una buena opción para contribuir al cuidado del planeta. Estas biomásas tienen gran potencial de ser usadas como combustibles sólidos debido a su baja emisión de gases de efecto invernadero, además de sus características aceptables en procesos térmicos.

Sin embargo, su implementación presenta serias limitaciones, debido a sus características fisicoquímicas negativas como alta humedad, baja densidad de la biomasa, bajo poder calorífico en comparación con el carbón y contenido de oxígeno alto, y algunas de las biomásas agronómicas son biodegradables y tienen una naturaleza hidrófila e higroscópica [2].

Con el fin de mejorar las desventajas antes descritas, se ha propuesto en la literatura la tecnología de pretratamiento térmico denominada torrefacción o pirólisis ligera. Este proceso consiste en someter a las biomásas a un rango de temperatura entre 200 y 300 °C en una atmósfera que puede ser tanto inerte como reactiva en periodos de tiempo variables, y tiene un efecto en el incremento del tiempo

de almacenamiento sin degradación de la biomasa, lo cual reduce el costo para su manipulación y almacenamiento [2], [3].

La energía necesaria para llevar a cabo este proceso puede provenir del aprovechamiento de calores residuales de procesos térmicos en los que se use la biomasa. Como consecuencia de este pretratamiento, se obtiene un biocombustible con bajo contenido de humedad (1-5% peso), poder calorífico inferior (18-23 MJ/kg), molienda clásica similar a los métodos para carbón pulverizado y densidad aparente (0,7-0,85 kg/l para pellets y 0,23 kg/l sin peletizar), en comparación con la biomasa inicial para aplicaciones térmicas como combustión o gasificación en calderas o estufas domésticas.

El efecto de la temperatura ha sido clasificado en procedimientos ligeros (200-235 °C), medios (235-275 °C) y severos (275-300 °C), a partir de métodos termo-analíticos clásicos, estos son: análisis termogravimétrico (TGA), análisis térmico diferencial (DTA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), en materiales como maderas y residuos de origen agrícola.

En [3], se evalúan las siguientes temperaturas: 250, 275 y 300 °C en sorgo; los autores encontraron que se incrementó la densidad de energía de esta biomasa hasta 1,6 veces después del proceso de torrefacción. En cuanto al efecto del tiempo de residencia en propiedades fisicoquímicas, en [3] se examinó en detalle el comportamiento de la torrefacción de una madera en un rango de tiempo de 0 min a 15 h. Los autores encontraron que el rendimiento sólido del producto disminuyó desde 85,0% a 0 min hasta 47,0% a 15 h. En cambio, el rendimiento de condensables incrementó desde 7,9% a 0 min hasta 19,6% a 2 h.

Entre los resultados presentados se destaca que en 250 °C y 15 h se incrementó el contenido de carbono, cenizas y oxígeno, con repercusión en un aumento hasta de 20% en el poder calorífico. También, sugieren que a medida que el tiempo de residencia aumenta durante la torrefacción, suceden reacciones de entrecruzamiento. El impacto social generado por este trabajo desde el punto de vista ingenieril está en la búsqueda de alternativas de obtención de combustibles sólidos a partir de una biomasa como fuente renovable y bajo impacto ambiental, cuyas propiedades fisicoquímicas pueden ser aptas para ser utilizadas a futuro en un proceso como la combustión.

Metodología

El esquema experimental consta de los siguientes componentes (ver figura 1): un cilindro de alimentación de gas inerte; un rotámetro para garantizar flujo constante de N_2 ; un motorreductor; un reactor de acero inoxidable 304 cubierto por resistencias eléctricas tubulares; un tornillo sinfín; un tubo recolector de biomasa; cuatro termopares tipo J para el registro de temperaturas para controlar los perfiles de temperatura de la pared del reactor; un tablero de control; y una trampa para la fracción líquida. El reactor de torrefacción tiene una longitud de 1 m con cuatro zonas de temperatura controladas para la recolección de las muestras torrefactas. El flujo del gas inerte fue de 4,7 L/min y el flujo másico de biomasa fresca fue de 48 g/min. En este estudio, se caracterizaron los biocarbones obtenidos a temperaturas de 225, 250 y 275 °C con análisis fisicoquímicos como poder calorífico, densidad a granel y morfología mediante microscopía electrónica de barrido.

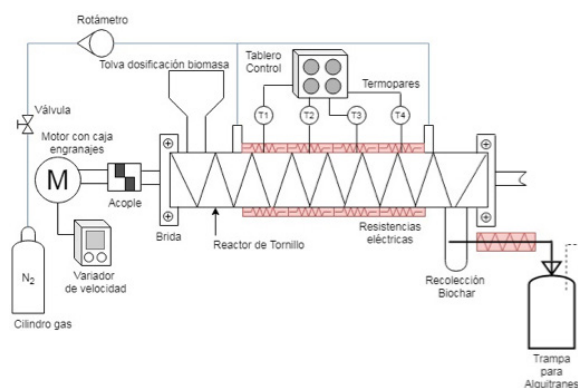


Figura 1. Esquema del reactor de torrefacción de tornillo

Fuente: elaboración propia

Resultados

La figura 2 muestra las fotografías del biocarbón de aserrín obtenido a 225, 250 y 275 °C en un tiempo de residencia constante a lo largo de todo el reactor. Se observa cómo las muestras se hacen más oscuras conforme el tratamiento de torrefacción es más severo. Este cambio

de color es debido al aumento del contenido de carbono en el material sólido, teniendo en cuenta que el carbonizado puro tiene una coloración negra.

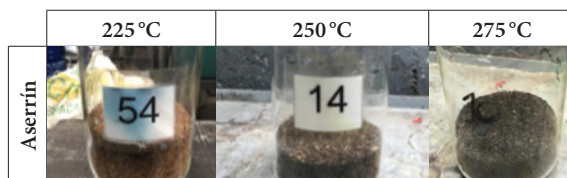


Figura 2. Fotografías de aserrín torrefacto a temperaturas de 225, 250 y 275 °C

Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, hay una disminución en la masa de muestra recogida, lo cual se corrobora cuando se pesan los recipientes con las biomazas torrefactas y se calcula la masa final. Lo anterior se puede apreciar en la figura 3, en la que también se observa que, al disminuir la fracción en masa del sólido, incrementa las fracciones de líquidos y gases.

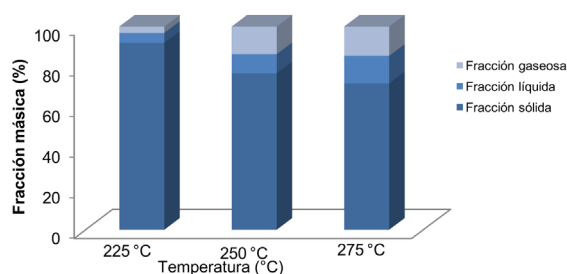


Figura 3. Producción de las fracciones sólidas, líquidas y gaseosas de aserrín a 225, 250 y 275 °C

Fuente: elaboración propia

La figura 4 presenta el efecto de la torrefacción en la densidad a granel. Se observa que la mayor diferencia existe entre todas las muestras y la muestra tratada a 275 °C, la cual tuvo el tratamiento más severo. Este comportamiento está asociado a un incremento de la porosidad en el material, como se muestra en la figura 5. En las micrografías, se observa a 225 °C una estructura superficial heterogénea, y conforme incrementa la temperatura a 250 °C y 275 °C, los poros son

más notables en algunas zonas conservando la heterogeneidad en su morfología.

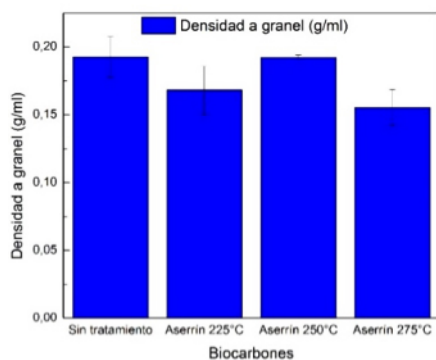


Figura 4. Efecto de torrefacción en densidad a granel del aserrín
Fuente: elaboración propia

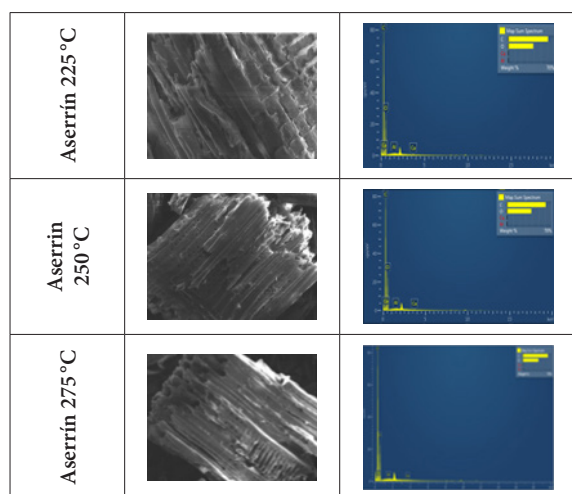


Figura 5. SEM-EDS de biocarbón de aserrín a 225 °C, 250 °C y 275 °C
Fuente: elaboración propia

Al ser la torrefacción un proceso de densificación energética, el aumento de la temperatura del proceso genera un efecto en el incremento del carbono fijo y una disminución del material volátil de las muestras tratadas, lo que lleva a un incremento del poder calorífico, como se observa en la figura 6. El poder calorífico superior (PCS) del biocarbón a 275 °C es comparable con un lignito Tunçbilek (27800 kJ/kg) y Soma (25400 kJ/kg). No obstante, en Colombia no existe este tipo de carbón; se tomó el carbón de El Cerrejón (PCS=27307 kJ/kg) como modelo base para

futuras aplicaciones de cocombustión con el biocarbón, puesto que el aserrín sin tratar es un residuo con PCS 36,4% menor en comparación con un carbón bituminoso.

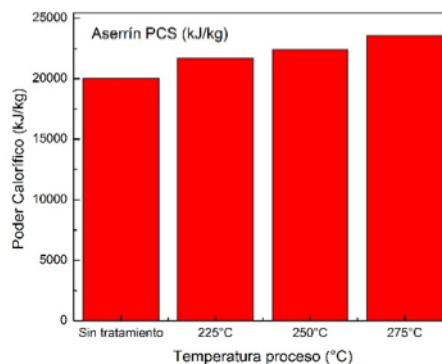


Figura 6. Poder calorífico del aserrín y aserrín torrefacto
Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El biocarbón de aserrín a 275 °C fue el que presentó un incremento de su poder calorífico en 18%; disminución de su densidad a granel y menor producción en masa de sólido. Este comportamiento está asociado al efecto del aumento en la temperatura de torrefacción, lo cual genera una disminución de la masa inicial de la muestra, y al efecto físico de poseer una superficie porosa en el material. Por tanto, esta biomasa puede ser utilizada para aplicaciones de combustión en dispositivos térmicos.

Referencias

- [1] Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental, "Política Nacional de Cambio Climático". Bogotá: Ministerio de Ambiente, 2017.
- [2] W.-H. Chen, J. Peng y X. T. Bi, "A State-of-the-art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 847-866, 2015.
- [3] J. Wannapeera, B. Fungtammasan y N. Worasuwannarak, "Effects of Temperature and Holding Time during Torrefaction on the Pyrolysis Behaviors of Woody Biomass". *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 92, n.º 1, pp. 99-105, 2011.

La microalga *Desmodesmus armatus* como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio

Catalina Quevedo Ospina¹

Adriana Patricia Villegas Quiceno²

Catalina Arroyave Quiceno³

Mariana Peñuela Vásquez⁴

¹ Fundación Universitaria María Cano

² Universidad Cooperativa de Colombia

³ Universidad de Medellín

⁴ Universidad de Antioquia
catalina.quevedo@udea.edu.co

Resumen

La contaminación de aguas provocada por los vertimientos de mercurio en Colombia es una problemática de interés nacional e internacional. Actualmente, el país es considerado como uno de los lugares más afectados. En este trabajo, se propone el uso de la microalga *Desmodesmus armatus* para el diseño de tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio. En este estudio, se evaluó la capacidad de crecimiento de la microalga *D. armatus* expresado como concentración final de biomasa (mg/L) y la capacidad de remoción de mercurio (mg de Hg total/g biomasa seca) para el día 16 de cultivo. Se utiliza un diseño experimental multifactorial con cuatro concentraciones de inóculo (35, 70, 145 y 225 mg/L) y cuatro concentraciones iniciales de HgCl₂ (0,0, 2,5, 5,0 y 7,5 mg/L). Como resultado, se obtuvo un crecimiento celular mínimo para todas las concentraciones de mercurio a 35 mg/L de inóculo; mientras que a mayores concentraciones de inóculo (70, 145 y 225 mg/L), se observó crecimiento celular de la microalga expuesta 2,5, 5,0 y 7,5 mg/L de HgCl₂. Sin embargo, a mayor concentración de HgCl₂, la concentración final de biomasa (mg/L) es menor. Las condiciones de cultivo donde se observó una mejor tolerancia de la microalga al mercurio correspondieron a 145 mg/L de inóculo y 5 mg/L de HgCl₂, concentración superior a los 3 µg/L reportados en algunos municipios de Colombia y 8 µg/L en otras regiones del mundo [1], por lo que *Desmodesmus armatus* puede considerarse como alternativa para la remoción de dicho contaminante de fuentes hídricas en Colombia.

Palabras clave: *Desmodesmus armatus*, metales pesados tóxicos, remoción de mercurio, tolerancia.



Introducción

Actualmente, una de las industrias que ocasiona más estragos ambientales a nivel mundial es la minería, especialmente la aurífera, considerada como la de mayor incidencia sobre los ecosistemas acuáticos. En Colombia, la extracción de este mineral se ha incrementado en 300% desde el año 2006, produciendo alrededor de 54000 kilogramos de oro al año, de los cuales el 91% corresponde a los departamentos de Chocó, Antioquia y Bolívar [2].

En la extracción nacional de oro a pequeña y mediana escala, aún se emplea mercurio de forma ilegal. Este metal está incluido entre los más peligrosos por su persistencia ambiental y alta toxicidad para gran variedad de organismos; puede cruzar la totalidad de la cadena trófica gracias a su capacidad de bioacumulación y bioaumento, afectando la biota acuática y provocando riesgos potenciales en los ecosistemas y en la salud humana. En plantas y algas causa estrés oxidativo y disrupción de la fotosíntesis, alterando el metabolismo, la estructura del ADN y los lípidos [3].

A los seres humanos, el mercurio llega por contacto directo con aguas contaminadas e indirectamente a través de la ingesta de peces y otros productos acuáticos, causando efectos adversos en riñones, pulmones, hígado, sistema gastrointestinal y hematopoyético, y especialmente en el cerebro, con un efecto neurotóxico. Aquellas personas que viven cerca de ríos contaminados con mercurio y emplean estas aguas en sus actividades diarias, quienes habitan municipios que hacen parte del recorrido natural de estas fuentes hídricas e incluso aquellos consumidores poco frecuentes de pescado en cascos urbanos alejados de las zonas de influencia, pueden ser susceptibles a efectos adversos [4].

Esta problemática requiere de medidas que permitan una disminución en el detrimento ecológico de las regiones colombianas directamente afectadas. Por ello, una de las alternativas que propone la biotecnología para el tratamiento de estas aguas es el empleo de microalgas, especialmente aquellas que pertenecen a la clase Chlorophyta, y los géneros *Chlamydomonas* [3], *Chlorella* [5] y *Scenedesmus* [6], [7], pues tienen la capacidad de absorber y metabolizar compuestos metálicos como hierro, zinc, cobre, cobalto, magnesio y manganeso, entre otros. Además, pueden absorber en su pared celular y biotransformar metales

pesados tóxicos como el mercurio, el plomo y el cadmio [8], [9].

Al género *Scenedesmus*, pertenecen cuatro subgéneros, entre ellos *Desmodesmus*, una microalga verde colonial de agua dulce que posee un tipo de plasticidad morfológica denominada polimorfismo, comúnmente descrita como un mecanismo de defensa o adaptación ante alteraciones en las condiciones ambientales, como longitud de onda, intensidad lumínica, temperatura, salinidad, tipo y concentración de nutrientes, incluidos iones metálicos [8]. Para esta especie en particular, ha sido poco estudiado el efecto que iones metálicos como el Hg^{2+} tienen en la fisiología, el metabolismo y la morfología celular, que son finalmente los factores asociados a la tolerancia del microorganismo al mercurio y la capacidad de remoción de este y otros metales en aguas reales. Por lo tanto, este trabajo busca determinar el efecto del $HgCl_2$ en el crecimiento celular de *Desmodesmus armatus*, que permita obtener condiciones de cultivo para la futura aplicación de esta microalga en la remoción del mercurio en fuentes hídricas colombianas y mejorar las condiciones ambientales de las regiones expuestas y la calidad de vida de aquellas personas que habitan dichas regiones y el país.

Metodología

Mantenimiento y propagación del cultivo

Se emplea una cepa de la microalga *Desmodesmus armatus*, perteneciente al grupo de Bioprocesos de la Universidad de Antioquia, conservada a 10 °C. Para su mantenimiento, se transfirieron células jóvenes en suspensión cada siete días a medio de cultivo fresco CHU-13, usando como fuente de carbono 0,4 g/L de $NaHCO_3$. Los cultivos son iluminados con luz led blanca a una intensidad lumínica de 20 $\mu mol/m^2 s$, un fotoperiodo de 12:12 y un pH inicial de 7,0.

Diseño experimental

Se llevó a cabo un diseño experimental multifactorial de dos factores: biomasa inicial (inóculo) y concentración inicial de mercurio; cuatro niveles: 0,035, 0,070, 0,145 y 0,225 g/L para biomasa y 0,0, 2,5, 5,0 y 7,5 mg/L para las concentraciones de $HgCl_2$, con

lo que se obtienen dieciséis tratamientos diferentes que son agrupados por concentración de HgCl_2 . Se cultivó la microalga con adición del contaminante (HgCl_2) en el tiempo cero. Las variables de respuesta son: concentración final de biomasa (mg/L) y capacidad de remoción de Hg (mg Hg total/g biomasa seca); solo se toman mediciones del tiempo inicial (t_0) y el tiempo final (t_{16}). Todos los experimentos se realizaron por triplicado sin control de temperatura y pH.

Métodos analíticos

La cuantificación de la biomasa se llevó a cabo por el método de peso seco filtrando la biomasa con membranas de $0,2 \mu\text{m}$ y secado en estufa; las lecturas se realizan hasta obtener peso constante. El mercurio total se determina por espectrofotometría de absorción atómica con generador de hidruros (SGE 712311 V1.30), y con estos datos se calcula la capacidad de remoción de Hg (mg de Hg/peso seco) empleando la ecuación (1).

$$\text{Capacidad} = \frac{C_{\text{Hg},i} - C_{\text{Hg},f}}{C_{X,f}}$$

Donde $C_{\text{Hg},i}$ y $C_{\text{Hg},f}$ representan las concentraciones inicial y final de mercurio total en mg/L, respectivamente; y $C_{X,f}$ representa la concentración final de biomasa en g/L.

Análisis estadístico

Los resultados son analizados usando el *software* R versión 2.15.3 (R Development Core Team 2013), empleando un análisis de varianza ANOVA y la comparación de grupos de tratamientos con prueba post-hoc de Tukey (prueba HSD).

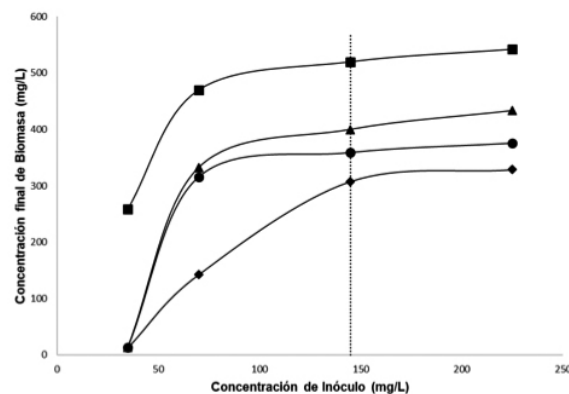
Resultados

Las concentraciones finales de biomasa (mg/L) en función del inóculo y para diferentes concentraciones iniciales de HgCl_2 se muestran en la figura 1a. Se observó inhibición del crecimiento celular para las concentraciones 2,5, 5,0 y 7,5 (mg/L de HgCl_2), en comparación con el crecimiento de la microalga en ausencia de Hg^{2+} . Además, para una concentración de inóculo de 35 mg/L a concentraciones iniciales de

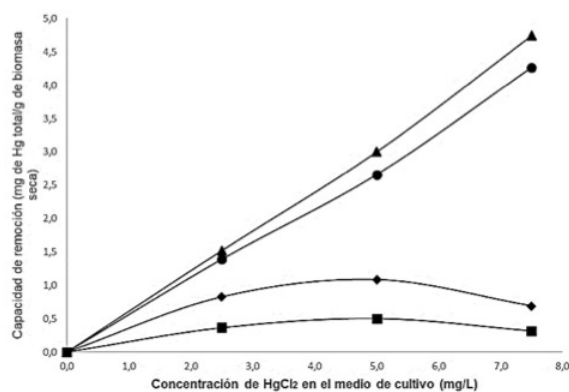
HgCl_2 (2,5, 5,0 y 7,5 mg/L) se observó una completa inhibición del crecimiento celular con 12,96 mg/L de biomasa final, que corresponde a 5% del crecimiento obtenido en ausencia de Hg^{2+} .

A un inóculo de 70 mg/L y una concentración inicial de 7,5 mg/L de HgCl_2 , se obtuvo una concentración de biomasa (14,22 mg/L) 3,3 veces menor que a la misma concentración de inóculo en ausencia de Hg^{2+} , con un porcentaje de inhibición del 69,74%. Además, se observó una diferencia significativa ($p < 0,05$, ic 95%) respecto a las concentraciones de biomasa obtenidas al mismo inóculo y 2,5 (33,22 mg/L de biomasa) y 5,0 (31,56 mg/L de biomasa) mg/L de HgCl_2 , con una reducción en el crecimiento celular de 57,19% y 54,93%, respectivamente. A concentraciones de inóculo mayores a 145 mg/L, la concentración final de biomasa se mantuvo estable y no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$, ic 95%) en comparación con 225 mg/L.

La figura 1b muestra las capacidades de remoción de mercurio (mg de Hg total/g biomasa seca) en función de la concentración inicial de HgCl_2 (mg/L) para todos los inóculos evaluados. Se observó que a 35 y 225 mg/L de inóculo, la máxima capacidad de remoción, 0,51 y 1,09 (mg Hg/g biomasa seca), respectivamente, se obtuvo a 5,0 mg/L de HgCl_2 . Mientras que a 70 y 145 mg/L de inóculo, se observó un comportamiento ascendente con una mayor capacidad de remoción de Hg^{2+} a 7,5 (mg/L de HgCl_2); no se presentó diferencia significativa entre estos dos tratamientos ($p > 0,05$, ic 95%). Sin embargo, la máxima capacidad de remoción a 70 mg/L (4,74 mg Hg/g biomasa seca) de inóculo es 0,9 veces mayor que la obtenida a 145 mg/L (4,26 mg Hg/g biomasa seca).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Concentraciones de biomasa final (mg/L) medidas en t_{16} para cada concentración de inóculo empleado a concentraciones iniciales de (■) 0,0, (▲) 2,5, (●) 5,0 y (◆) 7,5 mg/L de HgCl₂; (b) capacidad de remoción de HgCl₂ (mg de Hg total/g biomasa seca) determinadas en t_{16} para cada concentración de HgCl₂ (mg/L) empleada a inóculos de (■) 35, (▲) 70, (●) 145 y (◆) 225 mg/L

Fuente: elaboración propia

La microalga *D. armatus* presentó una alta tolerancia al mercurio; sin embargo, el crecimiento del microorganismo se ve afectado incluso a bajas concentraciones de HgCl₂. Se observó una reducción aproximada del 16% en la concentración final de mercurio para el inóculo más bajo (35 mg/L), lo que permitió deducir que la biomasa muerta tiene la capacidad de remover mercurio, comportándose como material bioabsorbente.

El comportamiento de la biomasa a 7,5 mg/L de HgCl₂ en comparación con las demás concentraciones, en las que se observó una mayor inhibición a bajas concentraciones de inóculo, permitió establecer que la concentración mínima inhibitoria debe estar alrededor de 5 mg/L de HgCl₂. Además, el comportamiento asintótico que se observó en la concentración final de biomasa para todos los tratamientos a partir de 145 mg/L de biomasa, sumado a la capacidad de remoción de mercurio obtenida para esta misma concentración de inóculo, permitió determinar que el inóculo óptimo para garantizar una máxima remoción de Hg se encuentra alrededor de 145 mg/L.

Estos resultados son comparables con lo reportado por Fathi [6], estudio en el que una cepa de *Scenedesmus bijuga* aislada del río Nilo fue sometida a concentraciones de HgCl₂ entre 50 y 2000 µg/L, y

se observó un decrecimiento en la biomasa a medida que se incrementó la concentración de Hg²⁺; para ellos, la concentración mínima inhibitoria se encuentra entre los 500 y 1000 µg/L, valores por debajo de lo reportado en el presente estudio.

De igual manera, Capolino *et al.* [7] trabajaron con *Scenedesmus sp.* AR-2489, aislada de una fuente contaminada con mercurio y adaptada por adición sucesiva de HgCl₂ al medio de cultivo. Los resultados muestran una disminución en el crecimiento celular a medida que se aumenta la concentración de Hg²⁺ a una concentración de inóculo de 180 mg/L; dicha cepa muestra crecimiento por encima de 5 µg/mL, concentración reportada en el presente estudio con una cepa cultivada sin adaptación al contaminante.

Conclusiones

Los resultados obtenidos durante este estudio permitirán, a mediano y a largo plazo, el diseño de tecnologías basadas en el uso de organismos acuáticos consumidores naturales de elementos metálicos (microalgas), que faciliten tanto el diagnóstico de la calidad del agua a través de bioindicadores, como el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio y otros metales pesados tóxicos. Esto contribuirá directamente a mejorar la calidad ambiental y a la recuperación de fuentes de agua potable, e indirectamente a la reducción de los niveles de intoxicación en las poblaciones expuestas en Colombia.

Referencias

- [1] F. A. Díaz-Arriaga, "Mercurio en la minería de oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano", *Rev. Salud Pública*, vol. 16, n.º 6, pp. 947-957, 2014. doi: <https://doi.org/10.15446/rsap.v16n6.45406>
- [2] J. S. Lara-Rodríguez, "All that Glitters is Not Gold or Platinum: Institutions and the Use of Mercury in Mining in Chocó, Colombia". *The Extractive Industries and Society*, vol. 5, n.º 3, pp. 308-3018, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.03.011>
- [3] R. Beauvais-Flück, V. I. Slaveykova y C. Cosio, "Cellular Toxicity Pathways of Inorganic and Methyl Mercury in the Green Microalga *Chlamydomonas reinhardtii*". *Scientific Reports*, vol. 7, n.º 1, pp. 1-12. [En línea], 2017. Disponible: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-08515-8>

- [4] Y. C. González, *Informe de estudios realizados en relación con la exposición a mercurio*. Bogotá: Ministerio de Salud y Protección Social, 2018.
- [5] V. Gómez-Jacinto, T. García-Barrera, J. L. Gómez-Ariza, I. Garbayo-Nores y C. Vilchez-Lobato, "Elucidation of the Defence Mechanism in Microalgae *Chlorella sorokiniana* under Mercury Exposure. Identification of Hg-phytochelatins". *Chemico-Biological Interactions*, vol. 238, pp. 82-90, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.06.013>
- [6] A. A. Fathi, "Toxicological Response of the Green Alga *Scenedesmus bijuga* to Mercury and Lead". *Folia Microbiologica*, vol. 47, n.º 6, pp. 667-671, 2002. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02818669>
- [7] E. Capolino, M. Tredici, M. Pepi y F. Baldi, "Tolerance to Mercury Chloride in *Scenedesmus* Strains". *BioMetals*, vol. 10, n.º 2, pp. 85-94, 1997. doi: <https://doi.org/10.1023/a:1018375005791>
- [8] J. M. Peña-Castro, F. Martínez-Jerónimo, F. Esparza-García y R. O. Cañizares-Villanueva, "Heavy Metals Removal by the Microalga *Scenedesmus Incrassatulus* in Continuous Cultures". *Bioresource Technology*, vol. 94, n.º 2, pp. 219-222, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.12.005>
- [9] P. A. Terry y W. Stone, "Biosorption of Cadmium and Copper Contaminated Water by *Scenedesmus abundans*". *Chemosphere*, vol. 47, n.º 3, pp. 249-255, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(01\)00303-4](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00303-4)

Producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de *Halomonas boliviensis* utilizando hidrolizado de gluten de trigo a escala biorreactor

Dalma Elizabeth Marsiglia López¹

Adriana Patricia Villegas Quiceno²

Natalia Andrea Gómez Vaneas¹

- 1 Universidad de Antioquia
2 Universidad Cooperativa de Colombia
dalma.marsiglia@udea.edu.co

Resumen

La producción de biopolímeros está siendo apoyada en todo el mundo, dado el impacto ambiental y la creciente conciencia sobre el uso abusivo de los plásticos convencionales de origen petroquímico. A pesar de los beneficios proporcionados por los biopolímeros y de la tendencia mundial a reemplazar los plásticos convencionales por polímeros ecológicos, en Colombia la producción de plásticos con propiedades biodegradables no se ha llevado a cabo a escala industrial. En este estudio, se evaluó la reducción de los costes asociados a la producción utilizando una fuente de nitrógeno económica en la industria colombiana (el gluten de trigo), a escala biorreactor considerando la influencia del suministro de oxígeno. Los resultados mostraron concentraciones de biomasa de $10,74 \pm 0,37$, $7,15 \pm 0,03$ y $17,83 \pm 0,57$ g/L, y una producción de biopolímeros de $2,46 \pm 0,05$, $2,00 \pm 0,11$ y $4,49 \pm 0,06$ g/L por kLa de 0,002, 0,001 y 0,006 s⁻¹, respectivamente, a las 72 h de tiempo de fermentación. Estos resultados son prometedores, ya que la adición de fuentes de nutrientes baratas en medios de cultivo puede hacer que la producción de PHB sea económicamente viable a escala industrial y, por lo tanto, que se convierta en el sustituto de los plásticos convencionales.

Palabras clave: biopolímeros, contaminación por plásticos, nutrientes económicos, producción de polihidroxibutirato.

Introducción

La industria de los polímeros ha ofrecido opciones de alta calidad sobre otros materiales gracias a sus excelentes propiedades, versatilidad y ventajas técnicas, lo que los hace materiales esenciales en cada escenario de nuestras vidas [1]. A pesar de todos sus beneficios, los polímeros más utilizados, los plásticos sintéticos, están provocando una creciente crisis medioambiental debido a la contaminación procedente del procesamiento y a su resistencia química, traducida en una velocidad de degradación lenta que lleva a grandes acumulaciones en vertederos y océanos. Esto causa graves problemas de salud por acción física directa o por la liberación de sustancias químicas contenidas en los plásticos que interfieren con los procesos fisiológicos de los animales y los seres humanos [2].

Considerando todas las razones anteriores, el mercado mundial del plástico está cambiando gradualmente hacia una producción sostenible que busca nuevas tecnologías para mejorar el uso de los recursos renovables y los procesos biotecnológicos. Esta tendencia se sustenta en el aumento de la conciencia ambiental, reflejada en el auge de nuevas y estrictas regulaciones ambientales alrededor del mundo, y en la introducción de biopolímeros como una alternativa potencial para reemplazar los plásticos sintéticos en el mercado [3].

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son una familia de polímeros biobasados y biodegradables, percibidos como un biomaterial atractivo por su gran versatilidad y variedad de propiedades, desde termoplásticos hasta elastómeros [4]. El polihidroxibutirato (PHB) es el miembro más estudiado de la familia pha y el primero que se ha producido a escala industrial [5]. El PHB es un biopolímero de cadena corta sintetizado por bacterias, y son cuerpos de inclusión acumulados en el citoplasma como una forma de almacenar el exceso de carbono bajo la limitación o la falta de nutrientes esenciales, a saber, nitrógeno, fósforo, azufre y oxígeno [6]. Sin embargo, el principal inconveniente del PHB son sus elevados costes de producción.

A pesar de los problemas ambientales y de la tendencia mundial a sustituir los plásticos convencionales por polímeros ecológicos, en Colombia no se ha iniciado la producción de plásticos con propiedades biodegradables. Sin embargo, el Gobierno ha hecho algunos esfuerzos para fomentar la defensa de la naturaleza y los cambios en los patrones de

producción y consumo de la sociedad colombiana. En 2017, se declaró un impuesto especial mediante el Decreto 2198 para desalentar y reducir el consumo de bolsas de plástico y fomentar la producción de bolsas de plástico biodegradables y reutilizables [7]. Contar con el apoyo del Gobierno de Colombia es necesario para impulsar la producción de biopolímeros a escala industrial, considerando todos los avances que se han desarrollado hasta el momento.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción de polihidroxibutirato a escala de biorreactor, utilizando un microorganismo efectivo suministrado con una fuente de nutrientes de bajo costo disponible en el mercado colombiano para lograr un costo comercial competitivo.

Metodología

Para la producción de PHB en el biorreactor, se preparó el inóculo utilizando la bacteria halófila *Halomonas boliviensis* (acumula 88% de PHB) con base en el procedimiento detallado por [8]. La fuente de nitrógeno (gluten de trigo) fue proporcionada por el INTAL (Institución de Ciencia y Tecnología Alimentaria, en Itagüí, Antioquia Colombia), y fue utilizada considerando su bajo costo y alto contenido en los aminoácidos ácido aspártico, ácido glutámico, glutamina y glicina, que favorecen el crecimiento y la producción de PHB utilizando dicha bacteria. La hidrólisis de la proteína se realizó añadiendo 26 g de esta y 1 mL de enzima Savinase®, 16 L en 1 L de agua a 70 °C, 400 rpm durante 12 h, para obtener un medio más soluble y con mayor disponibilidad de nitrógeno.

La fermentación se llevó a cabo en un biorreactor (Bioflo 110, New Brunswick Scientific, Estados Unidos) equipado con sondas de pH, oxígeno disuelto, temperatura y espuma. Se inoculó un biorreactor de 3 L con un volumen de trabajo de 2 L para iniciar la fermentación del PHB 33 °C hasta las 72 horas. Se agregó antiespumante antes del inicio de la fermentación y se mantuvo el pH en 8,0 utilizando 0,3 M HCl/NaOH [8]. El porcentaje de oxígeno disuelto se midió con un electrodo de oxígeno, el sensor de oxígeno Mettler Toledo DO INPRO 6000, 12 mm x 220 mm.

Para determinar las condiciones operativas adecuadas para la producción de PHB por *H. boliviensis* utilizando gluten de trigo como fuente de nitrógeno, se evaluó el efecto del oxígeno disuelto

en el crecimiento celular y la productividad de PHB. Para estos experimentos, el proceso de fermentación se dividió en dos etapas. En la primera, se indujo el crecimiento celular mediante el suministro de aire y la velocidad de agitación a los valores predeterminados máximos (5 vvm y 300 rpm) para evitar la limitación de oxígeno durante 24 h. En la segunda etapa, la velocidad de agitación se mantuvo constante a 300 rpm, y el caudal de aire se redujo, se aumentó o se mantuvo constante de acuerdo con cada ensayo; esta etapa fue evaluada durante 48 h.

Se recolectaron muestras de 10 mL en intervalos de tiempo definidos durante el cultivo de *H. boliviensis* y se analizaron para determinar el contenido de biomasa celular (método del *cell dry weight* (CDW) [9]), biopolímero (PHB por método ácido crotónico [10]) y glucosa (GLC por método DNS [11]). Para analizar los resultados, se empleó el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis de comparaciones múltiples por el método de la diferencia honestamente significativa (HSD) propuesto por Tukey. Los

cálculos se realizaron utilizando el *software* estadístico Statgraphics Centurion XVII v.17.0.16 (Statpoint Technologies, Inc., Virginia, Estados Unidos).

Resultados

En la figura 1, se muestran las cinéticas bajo diferentes condiciones de kLa de crecimiento celular, consumo de glucosa y producción de PHB. La producción de PHB comenzó en la fase de crecimiento exponencial y continuó hasta el comienzo de la fase estacionaria, lo que sugiere que tiene componentes asociados al crecimiento y no asociados al crecimiento. La concentración más alta de PHB, $4,49 \pm 0,06$ g/L, fue alcanzada bajo kLa de $0,006 \text{ s}^{-1}$. La duración de la fase de crecimiento exponencial disminuyó proporcionalmente con kLa , lo que sugiere una limitación del crecimiento con bajo suministro de oxígeno, ya que *Halomonas boliviensis* es una bacteria aeróbica.

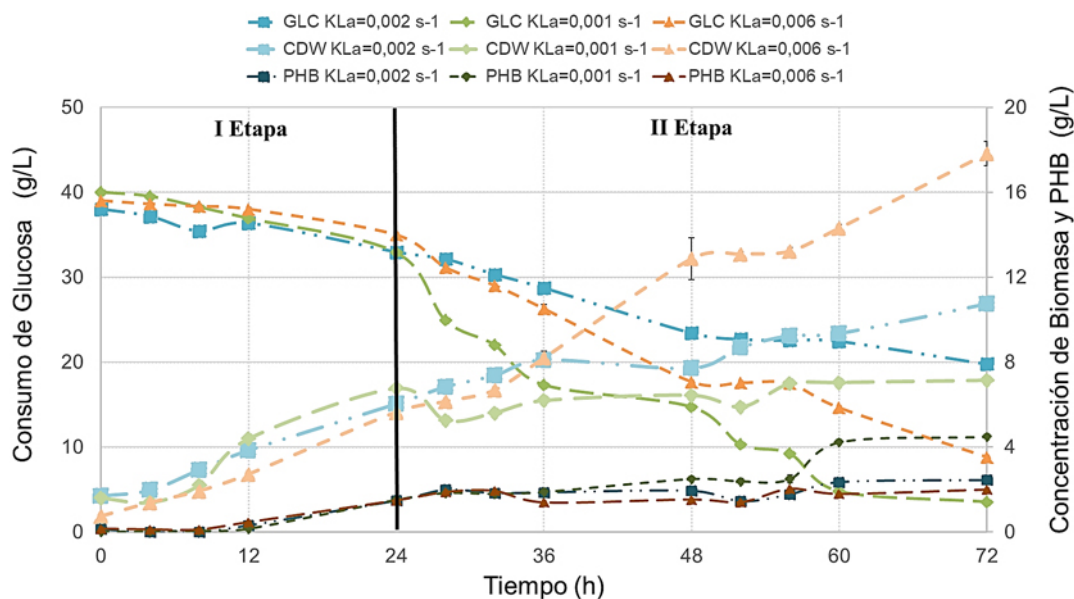


Figura 1. Cinética de la producción de PHB por *Halomonas boliviensis* a escala de biorreactor

Fuente: elaboración propia

La tabla 1 resume los parámetros cinéticos de las fuentes de nitrógeno evaluadas a las 60 h. El momento

en que se alcanzaron las concentraciones máximas de biomasa y PHB se indica entre paréntesis.

Tabla 1. Parámetros cinéticos de *Halomonas boliviensis* utilizando gluten de trigo

Parámetros cinéticos	3 vvm (kLa=0,002 s ⁻¹)	1 vvm (kLa=0,001 s ⁻¹)	5 vvm (kLa=0,006 s ⁻¹)
Máx. concentración biomasa (g/L)	10,74±0,37 (72 h)	7,15±0,03 (72 h)	17,83±0,57 (72 h)
Productividad biomasa (g/Lh)	0,16±0,00	0,12±0,00	0,24±0,00
Máx. concentración de PHB (g/L)	2,46±0,05 (72 h)	2,05±0,11 (56 h)	4,49±0,06 (72 h)
Rendimiento PHB sobre biomasa (g/g)	0,29±0,03	0,30±0,26	0,31±0,33
Productividad PHB (g/Lh)	0,04±0,00	0,03±0,00	0,07±0,02
Máx. acumulación PHB (% p/p)	29,25±0,98 (28 h)	35,96±1,89 (28 h)	29,87±0,13 (28 h)

Fuente: elaboración propia

La mayor acumulación de PHB, 35,96±1,89% en peso, se alcanzó para kLa de 0,006 s⁻¹ a las 28 h. Se obtuvieron valores más bajos de las acumulaciones de PHB para kLa de 0,002 s⁻¹ y 0,013 s⁻¹, sin diferencia significativa entre los valores obtenidos en estas dos condiciones a la misma hora.

La influencia de las diferentes concentraciones de O₂ en la producción de PHB durante la fase de acumulación de *Halomonas boliviensis* también fue estudiada por García-Torreiro, Lu-Chau y Lema [9]. Ellos determinaron que solo limitando el suministro de oxígeno se puede provocar acumulaciones de PHB del 37% (p/p), mientras que dando bajo suministro de O₂, pero también limitando la fuente de nitrógeno, causa mayores acumulaciones de PHB hasta del 73% (p/p).

La asimilación de oxígeno por *H. boliviensis* fue estudiada por Quillaguamán *et al.* [8], quienes encontraron solo 6,0 ±1,0% (p/p) de PHB debido a la restricción total del suministro de aire que inhibió el metabolismo de las células al utilizar 0,8 L/min de aire y 700 rpm velocidad de agitación. Sin embargo, posteriormente utilizaron un suplemento máximo de aire de 1,7 L/min y a 800 rpm durante 6 h y después redujeron la absorción de oxígeno, con lo cual la acumulación de PHB continuó durante 21 h a 41% (p/p). El mejor resultado, 49% (p/p) de PHB, lo obtuvieron al mantener constantes la tasa de aireación y la velocidad de agitación durante el cultivo, lo cual sugiere que existen mejoras cuando no hay limitación completa de oxígeno.

Los resultados de ANOVA para las variables de respuesta de la concentración final de biomasa y

productividad del PHB (60 h) mostraron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tres suministros de aire evaluados (valor P<0,05). Para saber qué medias eran diferentes entre sí, se evaluó la prueba de rango múltiple mediante el método Tukey HSD; los resultados mostraron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el uso de cada una de las velocidades de transferencia de aire.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la influencia del suministro de oxígeno para el crecimiento celular y la producción de PHB por *Halomonas boliviensis*. De las tres velocidades de transferencia de oxígeno evaluadas, kLa=0,006 s⁻¹ mostró los mejores resultados para concentraciones finales de biomasa y productividad de PHB a 60 horas de tiempo de fermentación.

A pesar de que *H. boliviensis* mostró grandes resultados a escala de biorreactor, se debe estudiar más trabajo que involucre diferentes estrategias de cultivo para mejorar el crecimiento celular y la productividad del polímero por parte de *H. boliviensis*.

Referencias

- [1] H. Namazi, "Polymers in our Daily Life", *BioImpacts*, vol. 7, n.º 2, pp. 73-74, 2017. doi: <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>

- [2] C. J. Rhodes, "Plastic Pollution and Potential Solutions", *Sci. Prog.*, vol. 101, n.º 3, pp. 207-260, 2018. doi: <https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211>
- [3] R. P. Babu, K. O'Connor y R. Seeram, "Current Progress on Bio-based Polymers and their Future Trends", *Prog. Biomater.*, vol. 2, n.º 1, pp. 1-16, 2013. doi: <https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8>
- [4] V. Steinwandter, "Bacterial Production of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) from Chicory Roots", *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 29, n.º 2, pp. 99-112, 2014. doi: <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2014.2250>
- [5] J. M. Naranjo, "Design and Analysis of the Polyhydroxybutyrate (PHB) Production from Agroindustrial Wastes in Colombia", tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2014.
- [6] A. Getachew y F. Woldesenbet, "Production of Biodegradable Plastic by Polyhydroxybutyrate (PHB) accumulating Bacteria using Low Cost Agricultural Waste Material", *BMC Res. Notes*, vol. 9, n.º 1, pp. 509, 2016. doi: <https://doi.org/10.1186/s13104-016-2321-y>
- [7] Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Decreto 2198 de 2017. Por el cual se modifica el epígrafe de la parte 5 del libro 1 y se adiciona el título 6 a la parte 5 del libro 1 del Decreto 1625 de 2016 único reglamentario en materia tributaria, para reglamentar el parágrafo 1 del artículo 512-15 y los numerales 3 y 4 del artículo 512-16 del Estatuto Tributario. Colombia, 26 de diciembre de 2017.
- [8] J. Quillaguamán, S. Hashim, F. Bento, B. Mattiasson y R. Hatti-Kaul, "Poly (β -hydroxybutyrate) Production by a Moderate Halophile, *Halomonas boliviensis* LC1 using Starch Hydrolysate as Substrate", *J. Appl. Microbiol.*, vol. 99, n.º 1, pp. 151-157, 2005. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02589.x>
- [9] M. García-Torreiro, T. A. Lu-Chau y J. M. Lema, "Effect of Nitrogen and/or Oxygen Concentration on Poly(3-hydroxybutyrate) Accumulation by *Halomonas boliviensis*", *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 39, n.º 9, pp. 1365-1374, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1612-y>
- [10] J. D. Gnanasekhar, *Production and Analysis of Polyhydroxybutyrate from Halomonas boliviensis*. Estocolmo: KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [11] G. L. Miller, "Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar", *Anal. Chem.*, vol. 31, n.º 3, pp. 426-428, 1959. doi: <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

Estudio teórico y experimental del desempeño térmico del cambio de refrigerante en equipo de congelación de helados

Óscar Orlando García Agudelo

César Augusto García Orrego

Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Instituto Tecnológico
Metropolitano

cesargarcia120402@correo.itm.edu.co

Resumen

Los equipos de congelación de helados son dispositivos que están presentes en una cantidad importante de pequeños comercios minoristas en Colombia. Estos dispositivos pueden llegar a representar la mitad del consumo de energía de estos establecimientos. A su vez, la refrigeración del helado contribuye al agotamiento de la capa de ozono debido a la fuga de refrigerantes clorados, que contienen clorofluorocarbonados (CFC) o hidrofluorocarbonados (HFC), tales como el R134a. En este trabajo, se presenta un estudio teórico y experimental del desempeño térmico de equipos de congelación de helados marca MiMet cv350 1A cuando se reemplaza el refrigerante con el que trabajan originalmente (R134a) por uno más amigable con el medio ambiente (R290). Se presenta un análisis del ciclo de refrigeración, en el que se evalúan variables en diferentes puntos para conocer el comportamiento de ambos refrigerantes. Esto permite conocer si el nuevo refrigerante (R290) cumple con especificaciones para la conservación de helados en el congelador. Además, se evalúa el consumo del compresor para determinar reducción significativa en el consumo energético de este equipo.

Palabras clave: congelador de helado, consumo específico, eficiencia energética, ciclo de refrigeración.

Introducción

Los congeladores permiten conservar alimentos y el helado requiere de una temperatura de -18°C para su almacenamiento [1]. El consumo energético en cualquier tipo de artefacto de refrigeración es elevado, en comparación con los demás electrodomésticos, debido a que estos equipos permanecen veinticuatro horas funcionando con periodos de ciclado.

Un análisis del ciclo de vida del helado, desde la producción de la materia prima (leche, cacao, etc.) hasta el consumo y la disposición final de los desperdicios generados, ha mostrado que 13% de la demanda de energía primaria total se puede atribuir al proceso de congelación y almacenamiento de producto en el punto de venta minorista [2]. Se evidenció que en los reportes escritos dejados como presentación a trabajos de campo e investigación surgen análisis para evaluar refrigerantes alternativos que permiten mitigar el daño a la capa de ozono ocasionado en parte por la fuga de refrigerantes tradicionales a la atmósfera.

Algunos autores evaluaron diversos refrigerantes alternativos sustitutos del R134a, registrando medidas de coeficiente de rendimiento (COP), además de efectos en el medio ambiente y en el entorno debido a propiedades termodinámicas como inflamabilidad, en R290 y R600a [3]. En una evaluación y comparación de las características de rendimiento de un refrigerador doméstico, en refrigerantes como el propano y mezclas de butano se observan mejoras en el COP de la mezcla de hidrocarburos con 60% de propano, siendo mayor que usando R134a [4].

Otros autores analizaron refrigerantes naturales como el agua (R718) y refrigerantes sintéticos como los clorofluorocarbonos (CFC), que causan el agotamiento del ozono estratosférico [5]. En un análisis de rendimiento comparativo de R290 con R22 en un ciclo de compresión de vapor estándar, llevado a cabo para diferentes temperaturas de evaporación a temperatura de condensación constante, se demostró que el coeficiente de rendimiento con R290 coincide estrechamente con el del R22, de modo que el R290 (propano) puede ser un mejor sustituto de R22 en aplicaciones reales [6].

Los resultados de un estudio de reacondicionamiento de un refrigerador indicaron que es posible reemplazar R134a con refrigerantes HC después de ajustar el tubo capilar a una longitud adecuada. Además, reemplazando R134a con refrigerantes HC

se puede obtener una mayor eficiencia energética expresada como factor de energía, lo que contribuye a frenar los efectos del calentamiento global [7].

Un estudio experimental, permite comparar el rendimiento térmico de refrigerantes como R22, R290, R1270, R438A, R404A, R410A y R32 con temperatura de evaporación desde -15°C hasta -5°C , utilizando una válvula de expansión electrónica y un compresor de velocidad variable. En un sistema de refrigeración (con el máximo de capacidad de enfriamiento), se mostró que el sistema con HC tiene valores de COP más altos y que con R32 [8].

Los estudios anteriores motivaron aún más la realización del análisis llevado a cabo en este proyecto, que evaluó un cambio de refrigerante en un sistema de congelación operando con R134a para sustituirlo por R290.

Metodología

Construir un análisis de eficiencia en un artefacto de congelación requiere conocimientos del sistema y su ciclo de refrigeración, y revisar la literatura que permitirá llevar el modelo experimental a un modelo teórico a través de fórmulas y ecuaciones.

Para hacer el estudio, se miden variables de manera experimental en varios puntos del sistema de refrigeración, como se muestra en la figura 1.

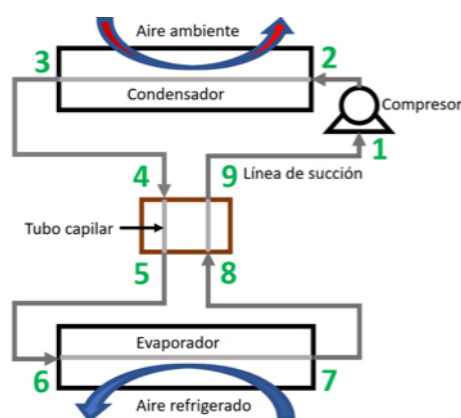


Figura 1. Ciclo de refrigeración del congelador

Fuente: elaboración propia

Los datos experimentales son analizados usando la ecuación para el balance de energía:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \underbrace{\sum_{\text{entrada}} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)}_{\text{Por cada entrada}} \\ = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \underbrace{\sum_{\text{salida}} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)}_{\text{Por cada salida}} \end{aligned}$$

Si se supone que los cambios de energía cinética/potencial son insignificantes y además existe una transferencia de calor del compresor a los alrededores, la potencia se puede derivar de la expresión anterior así:

$$\dot{W}_{\text{ent}} = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{Q}_{\text{sale del compresor}}$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a la salida y entrada del compresor, respectivamente. Se puede determinar también el trabajo del compresor con la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_{\text{comp}} = \frac{V * I * \cos(\phi)}{1000}$$

Las formas en las que el compresor transfiere calor al ambiente se dan por convección y radiación; este dato se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{comp}} &= \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = \\ hA_s(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon A_s(T_s^4 - T_{\infty}^4) \end{aligned}$$

Conociendo la temperatura a la cual el evaporador intercambia calor con el compartimiento del congelador (Q_L) y el trabajo realizado por el compresor (W_{ent}), se puede obtener el coeficiente de desempeño del ciclo de refrigeración:

$$\begin{aligned} \text{COP}_R &= \frac{\text{Salida deseada del equipo}}{\text{Entrada requerida}} = \\ \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{ent}}} &= \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} \end{aligned}$$

Este coeficiente es una medida del desempeño del equipo MiMet cv350 1A (mientras más alto mejor). Teóricamente, el COP_R más alto es el que alcanza un ciclo de refrigeración o ciclo invertido de Carnot, el

cual es reversible. Este COP_R reversible se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{COP}_{R\text{rev}} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

El intercambiador de calor de entre el tubo capilar y la línea de succión se da a presión y volumen constante; se obtiene que el cambio de entalpías es el mismo:

$$h_9 - h_8 = h_5 - h_4 = \Delta h$$

Resultados

Las variables medidas en el artefacto de congelación (presión, temperatura y flujo de aire) son analizadas usando ecuaciones termodinámicas; se demostró que el valor de COP utilizando ambos refrigerantes es cercano a 1. Con el refrigerante R290, es posible obtener temperaturas más bajas en el congelador, de hasta -22 °C, mientras que usando el refrigerante R134a se llega a una temperatura de -16 °C.

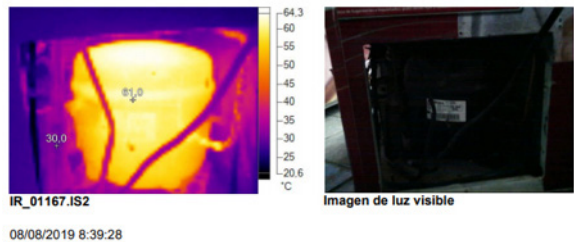


Figura 2 (izquierda). Termografía con compresor Embraco FFU 130HAX (REFRIGERANTE R134A)

Fuente: elaboración propia

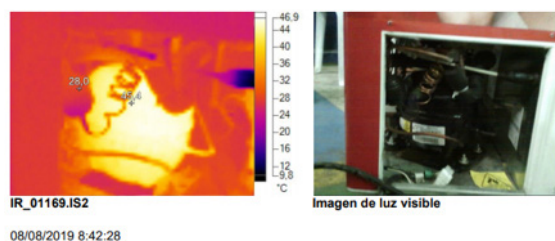


Figura 3 (derecha). Termografía con compresor Danfoss NUT55LR (refrigerante R290)

Fuente: elaboración propia

Como modificación al equipo de congelación, se cambió el compresor marca Embraco FFU 130HAX por un compresor marca Danfoss NUT55LR para operar el congelador con el refrigerante sustituto R290. Se mantuvo la longitud de diseño del tubo capilar en el equipo de congelación marca MiMet CV350 IA.

El equipo de congelación funcionando con el refrigerante sustituto (R290) registra un consumo de corriente de 1,1 amperios luego del arranque, algo mucho menor a lo registrado con los congeladores que funcionaban con refrigerantes tradicionales (R134a).

Conclusiones

El cambio del compresor favorece la disminución de consumo energético, pasando de consumir 6,6kWh al día (198kWh al mes) con el compresor Embraco a tener un consumo de 1,4kWh al día (43kWh al mes) con el compresor Danfoss. Esto significa una reducción de más del 50% en consumo total de energía en el equipo de congelación, lo cual reduce significativamente los costos de operación de comercios minoristas por concepto de consumo de energía.

El cambio de refrigerante contribuye además a un ambiente sostenible, disminuyendo el potencial de calentamiento global (GWP) en 100 años en 99,9%,

ya que se pasó de utilizar 200 g de R134a a 100 g de “R290”.

Referencias

- [1] Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec), NTC 1239 “Helados y mezclas para helados”. Bogotá: Icontec, 2002.
- [2] A. Konstantas, L. Stamford y A. Azapagic, “Environmental Impacts of Ice Cream”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 259-272, 2019.
- [3] J. Vaghela, “Comparative Evaluation of an Automobile Air-conditioning System using R134a and its Alternative Refrigerants”, *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 155-160, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.083>
- [4] M. El Kafafy y M. Fatouh, “Assessment of Propane/Commercial Butane Mixtures as Possible Alternatives to R134a in Domestic Refrigerators”, *Energy Conversion and Management*, vol. 47, n.º 15-16, pp. 2644-2658, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.018>
- [5] N. Abas, A. Raza Kalair, N. Khan, A. Haider, Z. Saleem y M. Shoaib Saleem, “Natural and Synthetic Refrigerants, Global Warming: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 557-569, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.099>
- [6] C. S. Choudhari y S. N. Sapali, “Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems”, *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 346-352, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.084>
- [7] C.-C. Yu y T.-P. Teng, “Retrofit Assessment of Refrigerator using Hydrocarbon Refrigerants”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, n.º 1-2, pp. 507-518, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>
- [8] A. H. Pontes Antunes y E. P. Bandarra Filho, “Experimental Investigation on the Performance and Global Environmental Impact of a Refrigeration System Retrofitted with Alternative Refrigerants”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 70, pp. 119-127, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.06.027>

3. Cuarta revolución industrial y tecnologías de la información y la comunicación (TIC)

Eficiencia energética e impacto ambiental como resultado de inteligencia artificial en el análisis de datos: aplicación en una planta de tratamiento de aguas residuales

Carlos Mario Sánchez Molina

Henry O. Sarmiento M.

Politécnico Jaime Isaza Cadavid
carlos_sanchez54181@elpoli.edu.co

Resumen

En el marco de la cuarta revolución industrial, el análisis de datos históricos es uno de los componentes fundamentales. En este sentido y direccionado hacia estudios de eficiencia energética, el presente trabajo describe la recopilación, depuración y clasificación de datos usando algoritmos basados en lógica difusa, en un proceso de centrifugado en una planta de tratamiento de aguas residuales. Utilizando un algoritmo de implementación sencilla como *Fuzzy C-means*, se le puede sugerir al operador acción o acciones a partir del análisis de datos, como la de reconfigurar el proceso para trabajar en zonas de mayor eficiencia en beneficio del medio ambiente.

Palabras clave: análisis de datos, clasificador difuso, eficiencia energética, impacto ambiental.

Introducción

En Colombia, hay una creciente expectativa entre los proveedores de servicios por ofrecer soluciones orientadas a la integración y el manejo de los datos para toma de decisiones. Tradicionalmente, las empresas recopilan grandes volúmenes de información que generalmente son muy poco utilizados; es reportado que menos del 0,5% de todos los datos recolectados son analizados o utilizados. Para los proveedores de servicios, es muy relevante el análisis de datos históricos que les puede ayudar a aprender el comportamiento de sus clientes para mejorar la calidad de los servicios, y aumentar ganancias y satisfacción del cliente [1].

A modo de ejemplo, en el sector de manufactura —como en otros sectores de la economía— el manejo de los datos y la información requiere un esfuerzo en la depuración y el análisis de la información que pueda arrojar resultados válidos y confiables para toma de decisiones; son retos principales a superar: la falta de colaboración entre departamentos y sistemas, y las fuentes de datos que son diversas. En la actualidad, para lograr la continua optimización de recursos son requeridos desarrollos direccionados al incremento en la eficiencia energética, haciendo uso y aplicación de técnicas de aprendizaje (basadas en datos) que redunden en el mayor aprovechamiento de la información disponible en empresas, industrias y procesos que impactan la sociedad en que están inmersos [2].

Entre muchos tópicos, en la industria del agua (de consumo o residual) los requerimientos de eficiencia pueden evidenciarse tanto en el proceso en sí, como en un producto de alta calidad, y ambos a bajos costos; estos beneficios pueden lograrse con la utilización de técnicas clásicas como la inteligencia artificial [3]. Se plantea que es posible obtener un modelo de estados funcionales de proceso mediante un esquema de supervisión basado en datos con algoritmos difusos y aprendizaje no supervisado, que permita identificar estados de ineficiencia energética como herramienta de apoyo al operador en la optimización de los recursos.

En este trabajo, se estudia un caso específico de analítica de datos a nivel industrial con datos reales recolectados durante tres meses, de una máquina centrífuga de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se hace el proceso de depuración y análisis estadístico de los datos, que luego son utilizados en la configuración de un sistema de supervisión basado en clasificadores del tipo difuso.

Las clases obtenidas con el clasificador son asociadas a estados operacionales de la máquina, entre los cuales se identifica la operación eficiente e ineficiente del proceso que requiere la implementación de acciones en tal sentido. La implementación del sistema permite hacer el análisis de los datos generando diagnósticos en línea que sirvan de soporte a las decisiones de operación en los procesos en el marco de la cuarta revolución industrial o la denominada industria 4.0. Esta revolución industrial, como lo indican Roblek, Meško y Krapež [4], busca en un ambiente colaborativo ofrecer a los operadores y técnicos de los procesos herramientas que les permitan la toma de decisiones en una búsqueda lógica de optimización de recursos materiales, técnicos y humanos.

Metodología

Generalmente, la depuración de datos consiste en cinco pasos: imputación de datos faltantes, detección de valores atípicos, eliminación de ruido, alineación de tiempo y estimación de retardo [5]. Los pasos para la captura y depuración de datos son:

Paso 1: recolección y centralización de los datos. Es recomendable la instalación de un servidor centralizado con conexiones en una red Ethernet a los equipos de la planta y el uso de protocolos abiertos (OPC o modbus TCP). Esto permite centralizar la información en una base de datos común, con la opción de subir la información a la nube dado que muchos proveedores de servicios de analítica de datos trabajan con este enfoque.

Paso 2: eliminación de datos nulos, fuera de rango o variables repetidas, y ajuste de números decimales son tareas que se pueden realizar con las herramientas propias del manejador de base de datos seleccionado, abordando en general problemas que se deben a la instrumentación con la que se miden las variables. También, se incluye completar los datos faltantes o los valores incompletos con los valores apropiados. La pobre preparación de los datos lleva a resultados de minería de datos incorrecta y no confiable, y a que la búsqueda de conocimiento sea de baja calidad.

Paso 3: realizar un análisis estadístico básico para lo cual se pueden usar herramientas comercialmente disponibles o trabajar con herramientas de uso libre como Python, que tiene ya implementadas las librerías para análisis estadístico, principalmente

análisis de máximos, mínimos y promedios que permiten identificar valores muy alejados de la media; estos valores extremos deben reemplazarse o eliminarse de ser posible, pues afectan los análisis posteriores significativamente.

Paso 4: análisis estadístico de correlación, el cual permite identificar parejas de variables con una alta correlación y proceder a mantener una de las variables ya que aporta toda la información.

Paso 5: análisis de los datos por tramos, que busca eliminar tramos donde los datos en conjunto presentan una variación mínima o no presentan variación. Las variaciones que se registran están relacionadas con el tipo de variables que se traten, y el tratamiento para los datos en cada caso deberá estudiarse en conjunto con el experto en el proceso.

Paso 6: normalizar los datos para lograr uniformidad de las diferentes variables; es necesario normalizar los datos a un rango tal como 0 a 1, -1 a 1, según se requiera.

Aplicación caso de estudio: máquina centrífuga en planta de tratamiento de aguas

Para el caso de estudio, las variables originales se capturan en tres archivos encriptados, en cumplimiento de la regulación de la FDA (Food and Drug Administration); los archivos están separados cada uno con 1887000 datos con un periodo de muestreo de cinco segundos.

Por medio de las herramientas propias de supervisión de las máquinas, se revisa y se hace un análisis preliminar de los datos que se recopilan. Una vez los datos están depurados, se clasifican fuera de línea usando la herramienta Matlab y el clasificador *Fuzzy C-means*, con lo que se obtiene la matriz de grados de pertenencia que permite implementar el sistema de supervisión.

La implementación del sistema de supervisión basado en el clasificador difuso fue realizada inicialmente en un emulador AC800F de marca ABB, y luego se descargó en el PLC de la máquina y se procedió a la validación en línea.

Los centroides U (grados de pertenencia representativos de las clases) obtenidos de la clasificación fuera de línea se configuran como valores constantes y se implementa la ecuación (1) para evaluar las distancias con base en cada muestra de variables.

$$D_j = \sum_{i=1}^N (V_i - U_{j,i})^2 \quad (1)$$

D_j es la distancia, V_i es la variable, N = número de variables.

Luego, la ecuación (2) se implementa para calcular los grados de membresía (GM = Grado de membresía) de cada muestra de variables a cada clase (M = número de clases). La clase es definida como j para la cual el valor máximo de GM_j se obtiene así:

$$GM_j = \frac{1}{\sum_{k=1}^M D_j / D_k} \quad (2)$$

Resultados

Después de varios ciclos de evaluación y prueba de resultados frente a los análisis correspondientes en la evolución y el desempeño del proceso, se obtiene un clasificador *Fuzzy C-means* con seis clases (iniciando en dieciocho clases) que se asocian a estados operacionales en la tabla 1.

Tabla 1. Clases, estados operacionales en la máquina y alertas al operador

Clase	Estado operacional	Alerta al operador
1	Máquina arrancando	Estado transicional
2	Máquina operando a baja velocidad diferencial	Alarma de operación
3	Operación normal	OK
4	Alarma crítica, muy baja velocidad diferencial	Verifique la entrada de lodo
5	Máquina parada	OK
6	Velocidad diferencial cero	Operación no recomendable

Fuente: elaboración propia

En la tabla 1, se identifican estados de particular interés. El caso de los estados 2, 4 y 6 en los que la máquina está en operación por un largo periodo, con diferencial de velocidad muy bajo, indica operación ineficiente pues ambos tornillos giran a una velocidad muy cercana. Es decir, el lodo no está siendo tratado adecuadamente y el operador no lo advertiría de

forma inmediata, y la máquina continuará operando en forma ineficiente.

Los estados 1, 3 y 5 se asocian con estados normales de máquina transicional, máquina operando y máquina parada, respectivamente. De la información recopilada en la entrevista con el experto operador de la máquina, se retoma: "Cuando la velocidad diferencial: delta, presenta muchos cambios, esto es un síntoma de problemas, normalmente la velocidad diferencial no debe cambiar mucho"; y además sugiere: "La velocidad diferencial: delta depende del aro, si la máquina no está espesando adecuadamente, se debe cambiar el aro, proceso manual y que requiere una solicitud al personal de mantenimiento para realizarlo; el tipo de aro a utilizar depende del lodo que está entrando, este lodo se analiza manualmente tomando muestras para laboratorio, si se usa el aro equivocado la máquina no funciona correctamente y el único indicio es los resultados de las pruebas de laboratorio".

En la figura 1, se observa el grafo de transiciones para las seis clases con indicación por flechas de los caminos posibles que pueden darse, y en la figura 2 están los resultados de las pruebas.



Figura 1. Grafo de estados

Fuente: elaboración propia

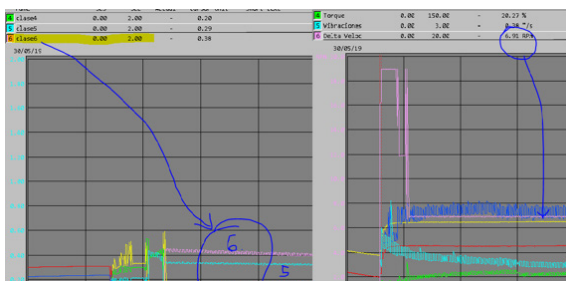


Figura 2. Resultados del clasificador en línea

Fuente: elaboración propia

Este grafo puede ser usado como interfaz por el operario de la máquina para que, en línea con el proceso, pueda ver ágilmente el estado actual del proceso con las acciones que se requieren y visualizar las posibles transiciones que podrían activar estados operacionales no recomendables.

Una clase se obtiene para cada ciclo de tarea del PLC en el emulador. Después de descargar la aplicación al sistema de control propio de la máquina y durante la primera semana de pruebas, el proceso registró un desempeño en la zona menos eficiente, que corresponde a la clase 6; esto se puede ver en la figura 2, en la que se aprecian las clases (a la izquierda) y los datos que corresponden efectivamente a velocidad diferencial muy baja (a la derecha).

Análisis de resultados

Con base en datos históricos y con análisis multivariable utilizando algoritmos difusos, se obtuvo el funcionamiento efectivo de un clasificador (seis clases) enfocado en la eficiencia del proceso. A nivel de diagnóstico, la clase 6 se identificó como de ineficiencia energética de operación no recomendable, por lo cual es necesario implementar las acciones correctivas correspondientes en cuanto a supervisión. Las pérdidas de energía calculadas por esta operación ineficiente durante una semana son comparables al consumo de energía de un hogar promedio durante dos años. Así mismo, es un hecho que la clase 6 no es un estado esporádico hallado en la base de datos de entrenamiento, pues se evidenció que puede presentarse continuamente y debe ser tomado en cuenta para mejorar la eficiencia en forma considerable y con gran impacto. Un seguimiento de clases es posible considerarlo dada la naturaleza difusa de la clasificación obtenida, cuando en cada muestreo es obtenida la clase y los grados de pertenencia a cada clase, y estos en un gráfico de tendencia resultan de utilidad al operador frente a la evolución del proceso y las acciones de prevención que pueda requerir.

Los reportes en literatura de procesos de optimización en plantas de tratamiento de agua abordan diversidad de técnicas y evidencian las posibilidades de intervención para mejorar desempeños, disminuir insumos y modificar o reconfigurar los sistemas. Sin embargo, muy pocos reportes atienden a la utilización de los históricos de datos como base para

esquemas de optimización, lo que particulariza aún más los resultados obtenidos y dificulta una comparación directa.

Conclusiones

Con el objetivo de tener un sistema de supervisión basado en clasificadores, fue necesario el preprocesamiento de un gran volumen y variedad de datos hasta obtener una base de datos ajustada del proceso. Con esta base, fue posible modelar el sistema por medio de estados (clases) que describen la máquina centrífuga de tratamiento de lodos y definir los estados de eficiencia como una herramienta en la toma de decisiones para los operadores del proceso.

El nuevo rumbo de la tecnología a partir de la industria 4.0 exige para el sector industrial el reto de mejorar la eficiencia en energía, lo cual contribuye a la mejora de condiciones ambientales; esto puede lograrse aprovechando el inmenso volumen de datos que se almacenan en los procesos.

La información que el operador de la máquina conoce acerca del proceso es muy importante si está acompañada por un adecuado plan de acción coherente con los requerimientos del proceso o sistema, y que las herramientas de análisis de datos recopilados sean de fácil implementación y rápida evaluación

como lo es el algoritmo de clasificación difuso utilizado.

Referencias

- [1] M. C. Cohen, "Big Data and Service Operations", *Production and Operations Management*, vol. 27, n.º 6, p. 1709-1723, 2018. doi: <https://doi.org/10.1111/poms.12832>
- [2] M. Munir, S. Baumbach, Y. Gu, A. Dengel y S. Ahmed, "Data Analytics: Industrial Perspective & Solutions for Streaming Data", en *Data Mining in Time Series and Streaming Databases*, Kaiserslautern: World Scientific, 2018, pp. 144-168. doi: https://doi.org/10.1142/9789813228047_0007
- [3] H. R. Hernández, J. L. Camas, A. Medina, M. Pérez y M. V. Lann, "Fault Diagnosis by LAMDA Methodology Applied to Drinking Water Plant", *IEEE Lat. Am. T.*, vol. 12, n.º 6, pp. 985-990, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2014.6893990>
- [4] V. Roblek, M. Meško y A. Krapež, "A Complex View of Industry 4.0", *SAGE Open*, vol. 6, n.º 2, 2016. doi: <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- [5] S. Xu, B. Lu, M. Baldea y W. Wojsznis, "Data Cleaning in the Process Industries", *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 31, n.º 5, pp. 453-490, 2015. doi: <https://doi.org/10.1515/revce-2015-0022>

Mantenimiento 4.0: la importancia de la transformación digital en la industria colombiana

Leidy Marcela Dueñas Ramírez

Juan Pablo Mira Díaz

Juan Felipe Rodríguez Martínez

Nafer Efrén Lizarazo Cárdenas

Universidad Eafit
lmduenasr@eafit.edu.co

Resumen

El avance acelerado en las tecnologías de la información y la comunicación, y su enorme uso en los procesos de producción industrial han impulsado los inicios de la cuarta revolución industrial, denominada industria 4.0, con la integración entre sistemas, máquinas y personas mediante el uso de tecnologías como: *Big Data*, internet de las cosas y sistemas ciberfísicos, entre otros. Este trabajo busca exponer la importancia de la transformación digital de la industria en Colombia y cómo esta afecta directamente la gestión del mantenimiento industrial que pretende alcanzar un nivel de organización y control sobre todo el ciclo de vida de los activos y la cadena de valor de los productos para responder a los desafíos del mercado.

Palabras clave: Big Data, CPS, industria 4.0, mantenimiento industrial, transformación digital.

Introducción

Evolución del mantenimiento y la integración con los avances tecnológicos: generalidades

El mantenimiento se puede considerar como una función para mantener una herramienta, máquina o sistema (simple o complejo) en condiciones óptimas de operación. Esta definición primitiva de mantenimiento simplifica y vincula el concepto de mantenimiento a los antiguos constructores cuando comenzaron a implementar máquinas simples para mejorar y facilitar sus profesiones nacientes. La naturaleza evolutiva de la filosofía de mantenimiento siempre ha estado a la par con las innovaciones tecnológicas; siempre cambiantes en el diseño de máquinas y equipos simples que se han transformado en sistemas complejos, sofisticados e indispensables [1]

En los últimos años, el rápido avance de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) ha facilitado la implementación de sensores avanzados, equipos de recopilación de datos, dispositivos de comunicación inalámbricos y soluciones informáticas remotas. Tales tecnologías, junto con los avances en el análisis predictivo, están cambiando el aspecto de la industria moderna [2]. Conceptos como sistemas ciberfísicos (CPS), *Big Data* e internet de las cosas (IoT), abordan la integración de sistemas físicos con modelos computacionales e integran una vasta área de aplicación que incluye control de procesos, energía, transporte, dispositivos médicos y militares, automatización, estructuras inteligentes, etc.

[3]. La implementación de análisis predictivo utilizando la implementación de estas tecnologías permite a los activos realizar un seguimiento continuo de su propio rendimiento y predecir fallas potenciales. Al implementar este análisis predictivo junto con un sistema de soporte de decisiones, se pueden solicitar servicios adecuados y tomar medidas para maximizar el tiempo de actividad, la productividad y la eficiencia de los sistemas industriales [4]

Mantenimiento 4.0 y su evolución en el tiempo

El término *industria 4.0* se define como un nuevo nivel de organización y control sobre toda la cadena de valor del ciclo de vida de los productos, y está orientado a los requisitos de los clientes cada vez más individualizados [5]. El objetivo central de la industria 4.0 es satisfacer las necesidades individuales de los clientes, lo que afecta áreas como la gestión de pedidos, la investigación y el desarrollo, la puesta en servicio de fabricación, la entrega e incluso la utilización y el reciclaje de productos [6]. El paradigma de la industria 4.0 promueve la conexión de elementos físicos como sensores, dispositivos y activos empresariales tanto entre sí como con internet [7].

En el marco de la evolución industrial, el mantenimiento ha dado respuesta a las necesidades que la producción masiva con altos estándares de calidad ha generado a lo largo del tiempo. Es por esto que frente a cada revolución que ha existido el mantenimiento ha tenido las siguientes características que lo definen (figura 1).



Figura 1. Evolución del mantenimiento en la industria

Fuente: elaboración propia

Horizontes de crecimiento en la industria colombiana

Toda empresa industrial debe pensar en su futuro desde diferentes ángulos, pero suelen hacerlo solo bajo el supuesto de la continuidad y la permanencia del negocio, lo cual no garantiza necesariamente la sostenibilidad y el crecimiento a mediano y a largo plazo. A medida que pasa el tiempo, las organizaciones deben reinventarse; por eso aquellas que han perdurado y crecido durante décadas, usualmente, han tenido grandes transformaciones que les han permitido tener vigencia en el mercado. Para toda empresa, es fundamental tener un flujo constante de nuevos negocios, que serán aquellos que proporcionarán las nuevas fuentes de ingresos. Los horizontes de crecimiento representan una manera efectiva de planear el flujo de nuevas fuentes de crecimiento. Cada horizonte representa el desarrollo de nuevos negocios, los cuales dependen, entre otras variables, de las capacidades de la organización para desarrollarlos, de la velocidad de los desarrollos de la competencia y de la velocidad del mercado que requiere dichos desarrollos [8].

Metodología

Cifras en Colombia: transformación digital y conocimiento de la industria 4.0

Para definir la importancia de la transformación digital en Colombia y de su impacto en el mantenimiento dentro de la nueva revolución industrial, se tienen en cuenta las cifras que la Encuesta de Transformación Digital 2016-2017 de la ANDI [9] nos entrega con información del sector manufacturero. En esta encuesta, se conocen los avances de lo que están adelantando los empresarios colombianos para aprovechar la economía digital.

En los resultados, es importante destacar el muy significativo aumento en la industria manufacturera del conocimiento en la industria 4.0, según se muestra en la figura 2. En la figura 3, podemos evidenciar cómo el empresariado colombiano cada vez está adoptando más estrategias para migrar sus negocios de un modelo tradicional a uno digital.

En la industria manufacturera, el 26,5% de las empresas ve transformado su negocio en un plazo de

dos años, mientras que el 58,8% considera que se transformará en cinco años, como se aprecia en la figura 4. Así mismo, en dicha industria el 87,9% de los empresarios invirtió en 2017 entre USD 50 000 y 500 000, y la inversión del sector principalmente se destinó a automatizar procesos (81,8%), reducir costos (54,5%) y lograr disrupción en su propia industria u otras industrias (45,5%), como se muestra en la figura 5.

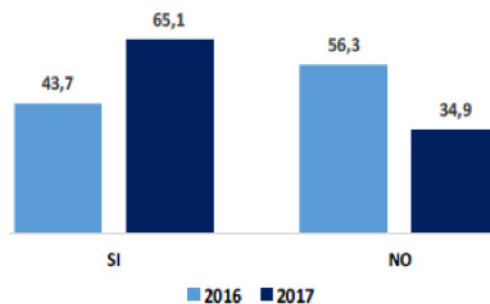


Figura 2. Porcentaje de empresas del sector industrial que conocen qué es la cuarta revolución industrial

Fuente: [9]

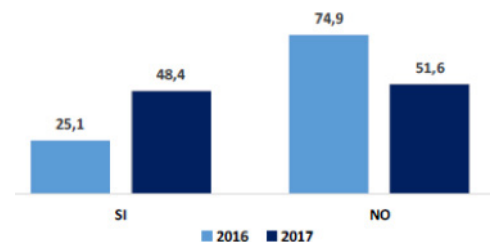


Figura 3. Porcentaje de empresas del sector industrial que tienen una estrategia de transformación digital

Fuente: [9]



Figura 4. En la industria manufacturera, ¿en cuánto tiempo su negocio será digital?

Fuente: [9]



Figura 5. Objetivos que busca la inversión en tecnología
Fuente: [9]

Cierre de brechas de innovación y tecnología en Colombia: modelación y análisis estratégico

Según [8], las tecnologías empleadas en el mantenimiento 4.0 (tales como el IoT) presentan un crecimiento acelerado y dinámico, por lo cual se requiere tomar decisiones inmediatas acerca de su desarrollo e implementación. La tecnología de *Big Data*, en particular, cuenta con un crecimiento acelerado y dinámico, por encima del comportamiento normal de la mayoría de las tecnologías. Los requerimientos en conocimiento científico y tecnológico son sustancialmente altos en el momento actual. Estas tecnologías analizadas por [8] tienen una gran relevancia para el país, por lo que son catalogadas como de interés.

Resultados

Actualmente, en Colombia el 48,4% de las industrias empieza a adoptar una transformación digital; y la mayoría cree que pueden tardar hasta cinco años en lograr una digitalización completa de sus negocios. Los empresarios colombianos suelen hacer inversiones en tecnología con el fin de automatizar sus procesos en el sector productivo y el de servicios, siendo consecuentes con la disminución del desconocimiento en temas de la cuarta revolución industrial.

Aunque hubo un aumento en el número de empresarios que tienen la transformación digital incluida entre sus estrategias, casi la mitad de los industriales aún no han adoptado estas estrategias vitales para seguir siendo competitivos en la demanda actual.

En términos de maduración tecnológica, las tecnologías 4.0 asociadas al mantenimiento apenas se encuentran en su primer punto de inflexión, empiezan a considerarse como tecnologías en crecimiento y son tecnologías base para muchos desarrollos.

Conclusiones

En la industria colombiana, aunque ha tenido un avance considerable en la implementación de tecnologías en sus procesos productivos, un porcentaje representativo de las empresas aún no ha iniciado la estrategia de transformación digital. Esto, en un futuro inmediato, tendría incidencia en la competitividad del país frente a mercados extranjeros ya avanzados en materia de industrias digitales.

Se requieren estrategias de transformación digital claras para la implementación de la industria 4.0 en los procesos del sector industrial del país. Esta transformación permite la implementación de una estrategia de mantenimiento 4.0 que aproveche las ventajas de la adquisición de datos en tiempo real mediante IoT, sensores especializados o sistemas ciberfísicos y el análisis de estos mediante Big Data, entre otras herramientas tecnológicas que asisten en la toma de decisiones de una organización.

Colombia se encuentra en un proceso de transformación digital, en el que no solo el sector industrial está involucrado y no solo el mantenimiento se ve afectado por esta revolución industrial. Todo el entorno social deberá ir adaptando sus formas de interactuar y de realizar sus labores cotidianas en aras de la eficiencia y la sostenibilidad, buscando el desarrollo global y competitivo del país.

Las tecnologías empleadas en el mantenimiento 4.0 son consideradas estratégicas en Colombia, pues soportan muchos sectores de la economía y además son consideradas importantes o de gran impacto. Se debe apostar por estas tecnologías, pues son aquellas que podrán generar crecimiento sostenible en los sectores y en el país en el futuro (a mediano y a largo plazo).

Referencias

- [1] J. Eyoh y R. S. Kalawsky, "Evolution of Maintenance Strategies in Oil and Gas Industries: The Present Achievements and Future Trends", presentado en

- FEAST International Conference on Engineering Management, Industrial Technology, Applied Sciences, Communications and Media (EITAC)*, Londres, Reino Unido, 28-29 de julio, 2018.
- [2] J. Shi, J. Wan, H. Yan y H. Suo, "A Survey of Cyberphysical Systems", presentado en *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, China, 9-11 de noviembre, 2011.
- [3] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri y H. A. Kao, "Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment", *Manufacturing Letters*, vol. 1, n.º 1, pp. 38-41, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- [4] J. Lee, H. D. Ardakani, S. Yang y B. Bagheri, "Industrial Big Data Analytics and Cyber-physical Systems for Future Maintenance & Service Innovation", *Procedia CIRP*, vol. 38, pp. 3-7, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026>
- [5] P. Gerbert *et al.*, "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries", Digital BCG. [En línea], 2015. Disponible: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx
- [6] R. Neugebauer, S. Hippmann, M. Leis y M. Landherr, "Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research", *Procedia CIRP*, n.º 57, pp. 2-7, 2016. doi: [10.1016/j.procir.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002)
- [7] K. Sipsas, K. Alexopoulos, V. Xanthakis y G. Chrysos-louris, "Collaborative Maintenance in Flow-line Manufacturing Environments: An Industry 4.0 approach", *Procedia CIRP*, n.º 55, pp. 236-241, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.013>
- [8] Asociación Nacional de Industriales (Andi), "Innpulsa Colombia. Cierre de Brechas de Innovación y Tecnología". [En línea], 2018. Disponible: <http://www.andi.com.co/Uploads/Estudio%20Cierre%20de%20Brechas%20Innovacion%20y%20Tecnologia-ilovepdf-compressed.pdf>
- [9] Asociación Nacional de Industriales (Andi), "Encuesta de Transformación Digital 2017". [En línea], 2018. Disponible: <http://www.andi.com.co/Home/Pagina/19-transformacion-digital%0Ahttp://www.andi.com.co//Uploads/Encuesta Transformación Digital ANDI.pdf>

Análisis de la enseñanza de la *suite* ofimática LibreOffice como estrategia para reducir el índice de piratería en las empresas de la subregión de Urabá

Jorge Iván Quintero Peláez

Universidad Católica Luis Amigó
jorge.quintero@amigo.edu.co

Resumen

En más de la mitad de los computadores en Colombia el *software* instalado es ilegal [1]. Por tal razón, se propuso ejecutar una estrategia pedagógica en el uso de herramientas de *software* libre [2], a fin de aumentar el uso de este tipo de aplicaciones y por ende reducir el alto índice de piratería, generando conciencia sobre los riesgos legales, éticos y de seguridad que implica instalar *software* privativo de manera ilegal. El trabajo se realizó durante el segundo semestre del año 2018; se aplicó la estrategia pedagógica en la utilización del *software* libre LibreOffice [3] a un grupo de comerciantes inscritos en la Cámara de Comercio de Urabá. Para esto, se utilizaron las salas de informática de la Cámara de Comercio y se diseñó un curso exclusivo para la investigación, enfocado en el uso de la *suite* ofimática de código abierto LibreOffice. La investigación mostró que todos los participantes, sin saberlo, usaban *software* privativo de manera ilegal, principalmente por la falta de información que existe al respecto. Al final de la aplicación de la estrategia pedagógica, los comerciantes manifestaron su interés de usar LibreOffice en lugar de la *suite* de Microsoft.

Palabras clave: LibreOffice, ofimática, piratería de *software*, *software* libre.

Introducción

En Colombia, el Estado realiza convenios con las grandes empresas fabricantes de *software* privativo para utilizar sus productos de forma gratuita en las instituciones educativas de todos los niveles [4]. Esta estrategia crea dependencia al uso de estos productos y casi que obliga a que los estudiantes, al dejar su institución educativa y llegar al mundo laboral, decidan instalar estos programas de forma ilegal, ya sea por el alto costo que tiene el *software* privativo o porque no hay una mayor difusión sobre las alternativas libres que existen.

En contraste con el caso colombiano, en España en los últimos dieciocho años se ha consolidado la adopción del *software* libre en varias ciudades. Inició en 2001 en Extremadura, la siguió Andalucía en 2004, y en los años siguientes se sumaron Zaragoza y Galicia. Por último, las dos ciudades más grandes de España, Madrid y Barcelona, se unieron a esta iniciativa [5].

Luego de analizar las posibles causas y consecuencias de usar *software* pirata, se planteó implementar una estrategia pedagógica en el uso de la *suite* ofimática libre LibreOffice, a fin de mostrar su facilidad de uso, su gran compatibilidad con todo tipo de formatos, incluidos los de su principal competidor, Microsoft Office, y finalmente lo fácil y amigable que es la migración del *software* comercial al *software* libre.

Metodología

Para fomentar la cultura del uso de *software* libre en los comerciantes de la Cámara de Comercio de Urabá, se implementó una propuesta pedagógica que partió por una evaluación diagnóstica que midió el nivel de conocimiento en tic y el desarrollo de competencias en el manejo de aplicaciones informáticas, tanto de uso privativo como de *software* libre.

Población: el municipio de Apartadó tiene una población aproximada de 180000 habitantes según el último censo. Basa su economía en la agricultura (principalmente de banano y plátano) y en el comercio. La Cámara de Comercio de Urabá agrupa a la gran mayoría de los comerciantes de la región, y les brinda capacitación y asesoría en temas comerciales y legales. Al finalizar el año 2018, había registradas más de 11 000 empresas y más del 95% eran microempresas.

Muestra: se tomó como muestra o población específica a 33 comerciantes inscritos en la Cámara de Comercio de Urabá, que decidieron hacer el curso de herramientas ofimáticas utilizando *software* libre. Se utilizó un tipo de muestreo probabilístico que, como menciona Hernández Sampieri [6], es un “muestreo por conveniencia”; esta característica se presenta debido a que se define como un procedimiento que permite seleccionar la muestra según la conveniencia del investigador. En este caso, se seleccionó este grupo debido a que estos comerciantes mostraron interés por participar en la investigación.

Procedimiento: se diseñó un curso de LibreOffice, con base en la revisión de varios cursos de Microsoft Office, en el que se enseñó a utilizar sus herramientas, desde las más básicas hasta otras de nivel más avanzado. Lo anterior se hizo con el fin de mostrar la facilidad de uso de las aplicaciones de LibreOffice, su compatibilidad y la fácil adaptación que existe al cambiarse de *suite* ofimática. Para el desarrollo del curso, la Cámara de Comercio facilitó el uso de una de sus salas de cómputo, que cuenta con 33 computadores de escritorio con conexión a internet.

Temas del curso de LibreOffice

Editor de Texto Writer (Word en la *suite* de Microsoft):

Administración de documentos - Edición y formato de texto - Herramientas de párrafo - Bordas y herramientas de fondo de página - Ortografía y gramática - Insertar páginas y tablas - Encabezado y pie de página - Configurar página - Manejo de gráficos - FontWork (WordArt) - Herramientas de imagen - Editor de ecuaciones - Combinación de correspondencia.

Presentador de Diapositivas Impress (Powerpoint en la *suite* de Microsoft):

Administración de diapositivas - Textos y herramientas de párrafo - Gráficos - FontWork (símil de WordArt) - Insertar imágenes - Herramientas de dibujo y formas - Temas - Transición de diapositivas - Intervalos - Herramientas de imagen.

Hoja de Cálculo Calc Nivel Básico (Excel en la *suite* de Microsoft):

Gestión de datos - Formato - Fuente - Alineaciones de celdas - Valores de las celdas - Manipulación de la hoja de cálculo - Funciones de cálculo 1 - Funciones de cálculo 2 - Asistente de gráficos - Inserción de imágenes - Insertar formas - Diseño y configuración de la página.

Hoja de Cálculo Calc Nivel Intermedio (Excel en la *suite* de Microsoft):

Nombre de rango de celdas

- Formato condicional - Gráficos - Bases de datos - Fórmulas y funciones (Lógicas, de texto, Estadísticas, Contables, Financieras) - Tablas dinámicas.

En la primera sesión, se mostraron imágenes de tres aplicaciones incluidas en la *suite* LibreOffice: Writer, Calc e Impress. En los tres casos, la pregunta era ¿conoce el programa que ve en la imagen? El 100% de los participantes encuestados respondió esta pregunta indicando que se trataba de las aplicaciones de la *suite* ofimática de Microsoft: Word, Excel y Power Point.

El proyecto se desarrolló en fases: inicial, diagnóstico, ejecución y cierre. En la fase inicial, se realizaron tareas de diagnóstico y ajustes a la propuesta pedagógica, esto permitió delimitar el alcance del proyecto. En la fase de diagnóstico, se aplicaron encuestas y test de conocimiento tanto del uso de herramientas informáticas, como de las normas, leyes y penas que rigen el campo de los derechos de autor, entre lo que se encuentra el *software* como producto comercial.

En la tercera fase, se implementaron estrategias de seguimiento, observación y control. Se desarrollaron las actividades claves para el logro de los objetivos y se hizo un registro periódico de los hallazgos. Se implementó la propuesta pedagógica para mejorar el nivel de competencia en el manejo de *software* libre de los comerciantes participantes en el proyecto, a través de encuentros pedagógicos para el fortalecimiento de dichas competencias; y finalmente se hizo un nuevo diagnóstico que permitió evidenciar el mejoramiento en dichas competencias. Después, se analizaron los resultados obtenidos y los hallazgos encontrados. Todo esto se incluyó en el informe final de proyecto.

Resultados

A continuación, se muestra un resumen de los datos recolectados, específicamente los datos del pretest y del test final, para mostrar una comparación entre los dos tiempos.

Tabla 1. Matriz de relación de competencias y resultados de las pruebas diagnóstica y final

Preguntas	Competencias específicas	Pretest		Test final	
		Sí	No	Sí	No
1	Conceptualizo los tipos de procesadores de texto	12	21	18	15
2	Identifico las herramientas de <i>software</i> ofimático	2	31	30	3
3	Reconozco la interfaz de un <i>software</i> específico	0	33	29	4
4	Relaciono información de imágenes con aplicaciones informáticas libres	0	33	33	0
5	Relaciono información textual con información que no está explícita	10	23	33	0
6	Contextualizo la información solicitada con mi realidad	33	0	33	0
7	Identifico información preexistente en el medio sobre el tema cuestionado	33	0	33	0
8	Identifico aplicaciones de <i>software</i> usadas en el medio laboral	20	13	33	0
9	Expreso ideas argumentadas sobre el tema cuestionado	13	20	33	0
10	Caracterizo información explícita mediante imágenes y texto	0	33	33	0
11	Identifico los tipos <i>software</i> existentes	16	17	29	4
12	Argumento la elección personal frente a opciones de una situación particular como parte de mi cultura frente al tema	16	17	29	4
13	Identifico conocimientos previos frente al tema cuestionado	22	11	29	4
Total		177	252	395	34

Fuente: elaboración propia

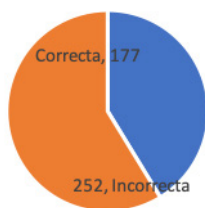


Figura 1. Gráfica de las respuestas del pretest

Fuente: elaboración propia



Figura 2. Gráfica de las respuestas del test final

Fuente: elaboración propia

Por último, se realizó una encuesta vía telefónica seis meses después de la implementación de la estrategia, consultando a los comerciantes involucrados en el proyecto si estaban usando *software* libre o si habían vuelto a usar *software* comercial de pago sin la licencia legal.



Figura 3. Datos recopilados en encuesta telefónica

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

La lucha contra el uso de *software* pirata se centra en un aspecto básicamente cultural. La falta de información

de los riesgos legales y de seguridad, y la falta ética que implica el hecho de no respetar los derechos de autor son características que se pueden cambiar en una sociedad a través de la difusión, de la información y de la decisión política de hacerlo por medio de capacitación y de hacer un seguimiento constante.

A partir de lo observado en la primera sesión, se pudo interpretar que para el usuario es indiferente la marca o el nombre de la aplicación que usa, siempre y cuando cumpla con sus necesidades. Es de aclarar que esto puede deberse a que la *suite* ofimática de Microsoft ha reinado por décadas y acostumbró a los usuarios a su entorno gráfico. También se pudo identificar que las aplicaciones de *software* libre que usan entornos similares a las comerciales facilitan al usuario la migración.

Al finalizar este proyecto, los participantes informaron estar usando *software* libre y manifestaron su intención de continuar haciéndolo. Seis meses más tarde, la gran mayoría había vuelto a usar *software* de pago sin licencia original. Esto último mostró que la estrategia de difusión y capacitación fue exitosa, pero que se debe hacer un seguimiento constante para garantizar el éxito de la estrategia a largo plazo.

Referencias

- Revista Semana, “En Colombia una de cada dos empresas usa *software* pirata”. [En línea], 16 de junio de 2016. Disponible: <https://www.semana.com/tecnologia/articulo/software-pirata-en-colombia-una-de-cada-dos-empresas-los-usa/477981>
- The Document Foundation, “Todo sobre *software* libre”. [En línea], 7 de febrero de 2013. Disponible: <https://blog.documentfoundation.org/blog/2013/02/07/the-document-foundation-announces-libreoffice-4-0/>
- LibreOffice, “¿Quiénes somos?”. [En línea]. Disponible: <https://es.libreoffice.org/acerca-de/quienes-somos/>
- El Universal, “Presidente Santos firmó acuerdo de cooperación con Microsoft”. [En línea], 4 de diciembre de 2013. Disponible: <https://www.eluniversal.com.co/tecnologia/presidente-santos-firmo-acuerdo-de-cooperacion-con-microsoft-144427-GREU234345>
- J. Amador, “*Software* libre y administraciones públicas: amigos para siempre”, OpenExpo Europe. [En línea], 13 de febrero de 2017. Disponible: <https://openexpo-europe.com/es/software-libre-y-administraciones-publicas/>
- R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación* (6.ª edición), México D.F.: McGraw-Hill, 2014.

Modelo de control de calidad de procesos aplicando mapas cognitivos difusos

Juan Miguel Cogollo Flórez
Orfani Margot Valencia Mena

Instituto Tecnológico
Metropolitano
juancogollo@itm.edu.co

Resumen

Los crecientes cambios en los procesos productivos y de gestión de cadenas de suministro, debido a la inserción de recientes avances tecnológicos, se han convertido en uno de los más grandes desafíos para el aseguramiento de la calidad. Así, se han generado campos de investigación y desarrollo de nuevas metodologías que permiten la adaptación de los sistemas de calidad con los nuevos sistemas de producción y de gestión de la cadena de suministro. Por tanto, es indispensable la investigación sobre desarrollo de nuevos modelos de control de la calidad que faciliten la integración de los sistemas de aseguramiento de la calidad heredados con los nuevos modos operativos de los procesos productivos a nivel intraorganizacional e interorganizacional. Una de las herramientas más eficaces que permite fácilmente esta integración son los mapas cognitivos difusos (*fuzzy cognitive maps*). Por ello, en este trabajo se desarrolla un modelo de control de calidad de un proceso de carbonatación de bebidas usando mapas cognitivos difusos, con el fin de contribuir a la generación de nuevo conocimiento en el área de modelado de procesos usando técnicas de *soft computing*. La principal ventaja de este enfoque de modelado es su simplicidad, flexibilidad y adaptabilidad para predecir el nivel de calidad del proceso estudiado, con base en la determinación y el análisis de las interacciones entre las variables del proceso.

Palabras clave: carbonatación, control de calidad, mapas cognitivos difusos, modelos, *soft computing*.

Introducción

Los crecientes cambios en los procesos productivos fruto de la inserción de nuevas tecnologías se han convertido en uno de los más grandes desafíos para el aseguramiento de la calidad, generando nuevos campos de investigación y creación de nuevas metodologías que permitan la adaptación de los sistemas de calidad a los nuevos sistemas de producción y administración de procesos, caracterizados por la automatización y elaboración de productos ajustados al gusto de cada consumidor. En este contexto, es pertinente la investigación y el desarrollo de nuevos modelos de control de calidad que faciliten la integración de los sistemas tradicionales con los nuevos modos operativos en cuanto a procesos productivos y en el desarrollo y la prestación de servicios.

Por otro lado, los mapas cognitivos difusos (MCD) son estructuras, grafos o representaciones gráficas utilizadas para representar el razonamiento causal. La estructura del grafo permite el avance hacia atrás o hacia adelante, lo que admite analizar la correlación directa o inversa de diversos eventos relacionados entre sí [1]. Los MCD tienen diversas aplicaciones en diferentes áreas, entre las cuales se destacan la medicina, el sector automotriz y la administración. La aplicación de los MCD ha demostrado su efectividad como herramienta de control y toma de decisiones.

Con base en lo anterior, y con el fin de contribuir a la generación de nuevo conocimiento en el área de modelado de procesos usando técnicas de *soft computing*, en este trabajo se desarrolla un modelo de control de calidad de un proceso de carbonatación de bebidas usando mapas cognitivos difusos. Este modelo permite determinar los factores que influyen en la calidad del producto final y observar cómo los cambios de estos factores puede incidir en el volumen final del CO₂ de la bebida, y así tomar las decisiones correctas para garantizar la calidad del producto.

Control de calidad de procesos

Según Gutiérrez [2], la palabra *calidad* está relacionada con el conjunto de atributos o propiedades de un objeto que permite emitir un juicio de valor acerca de este; del análisis o la percepción de estos atributos se deriva el concepto de nula, buena o excelente calidad. La calidad puede ser un concepto confuso, puesto que depende en parte de lo que consideran las personas según su punto de vista y las empresas

según su rol en la cadena de suministros; además, el significado de calidad sigue evolucionando conforme a los avances tecnológicos y sociales.

Los actuales modelos de control de la calidad de procesos son estáticos y pueden presentar falencias al no considerar las diferentes incertidumbres posibles entre las variables de los procesos, generando errores de pronósticos e incluso aumentos en los costos de calidad con posibles impactos sociales y ambientales. De allí que surja la necesidad de desarrollar metodologías de control de calidad que sean dinámicas y que permitan la obtención de resultados más acertados para la toma de decisiones orientadas al mejoramiento de los productos y procesos y, por ende, de la satisfacción del cliente y la sociedad en general.

Evans, Foster y Linderman [3] consideran que los retos actuales de investigación en calidad deben centrarse en el desarrollo de modelos analíticos que superen el enfoque descriptivo tradicional y que representen de mejor manera la complejidad de variables, factores y agentes que influyen en el cumplimiento de las características de calidad de los bienes y servicios ofrecidos a la sociedad.

Conceptualización de mapas cognitivos difusos

Los MCD son una técnica de *soft computing* que se ha utilizado para modelar y simular diversos sistemas en diferentes áreas. Los MCD se originaron a partir de la combinación de las redes neuronales y la lógica difusa; se utilizan para modelar el comportamiento de un sistema en términos de conceptos interactivos que representan las variables, lo cual los hace fáciles de interpretar dado que son similares al razonamiento humano [4].

Los MCD son una extensión de los mapas cognitivos, los cuales demuestran cómo la mente humana procesa la información mediante la reorganización de los problemas para luego demostrarlo gráficamente a través del mapeo de conceptos interconectados; esto le permite a la persona encargada de tomar decisiones analizar las posibles relaciones ocasionales entre conceptos, con el fin de descubrir soluciones más relevantes y efectivas ante las diferentes situaciones [5].

Los MCD son una representación causal e ilustrada para modelar cualquier sistema (figura 1); se representan con una gráfica causal que consiste en conceptos interrelacionados. Son grafos dirigidos con signos difusos que permiten la retroalimentación, en

la que se observa cómo el arco ponderado del concepto causa C_i influye sobre el concepto afectado C_j ; los valores del grafo son difusos por lo que los conceptos toman valores entre $[0,1]$ y los pesos de los arcos están entre $[-1,1]$, como se indica en [4].

El valor A_i del concepto C_i expresa el grado de correspondencia física; en cada paso de la simulación el valor A_i de un concepto C_i se recalcula, teniendo en cuenta la influencia de otros conceptos C_j en el concepto específico, siguiendo la regla de cálculo de la ecuación de actualización:

$$A_i^{k+1} = f(A_i^k + \sum_{j=1}^N j \neq i A_j^k w_{ji}) \quad (1)$$

Donde A_i^{k+1} es el valor del concepto C_i en el paso de simulación $t+1$, A_j^k es el valor del concepto interconectado C_j y w_{ji} es el peso de la interconexión entre los conceptos C_i y C_j y $f(.)$ es una función de umbral sigmoide:

$$f = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

Donde $\lambda > 0$ es un parámetro que determina la fuerza de la interconexión entre los conceptos C_i y C_j .

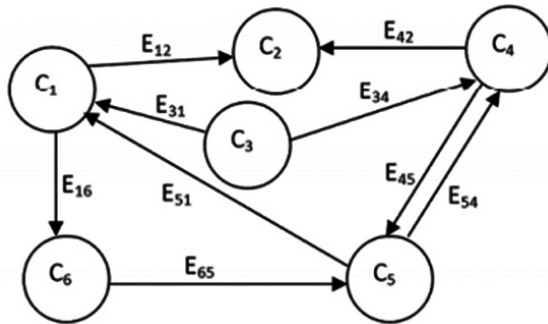


Figura 1. Ejemplo de esquema general de un MCD
Fuente: elaboración propia

El modelo básico de los MCD utiliza conceptos abstractos cuyo valor va cambiando con la ecuación de actualización (1), hasta que la simulación alcanza el equilibrio. Al ser observada la representación gráfica, queda claro cuál concepto influye y de qué manera en los demás conceptos que conforman el modelo. Los conceptos pueden provenir de diferentes fuentes, como es el caso de la opinión de expertos y

no expertos que construyen el modelo según el tema que se investiga o al cual se le aplica la simulación. Los MCD usan lógica difusa, lo que permite incorporar la incertidumbre, los aspectos cualitativos y los procesos de retroalimentación presentes en el sistema a simular; es por ello que resulta útil en el análisis de los cambios de un sistema [1].

El comportamiento dinámico de los MCD depende de su estructura y del mecanismo de inferencia que define la forma de transición al pasar del estado t al estado $t+1$. Así, se pueden esperar tres resultados diferentes: (a) cuando el vector de estado se asienta en algún valor estacionario después de una serie de pasos finitos, entonces se alcanza el llamado punto fijo; (b) el vector de estado se asienta periódicamente en un mismo valor de estado después de un número finitos de pasos; y (c) el vector de estado cambia caóticamente, lo que se denomina atractor caótico.

Aplicaciones de los mapas cognitivos difusos en control de procesos

Los MCD tienen aplicaciones en diversas áreas como administración, medicina, agricultura, automotriz, entre otras. Papageorgiou *et al.* [6] desarrollaron una metodología para modelar el rendimiento y el manejo de cultivos de manzanas usando *fuzzy cognitive maps* (FCM), donde los nodos representan los principales factores del suelo que afectan el rendimiento y los arcos dirigidos muestran las relaciones causa-efecto entre las propiedades del suelo y el rendimiento. El análisis realizado por los autores mostró la superioridad del enfoque de aprendizaje de FCM en la predicción del rendimiento.

Poczeta y Papageorgiou [7] desarrollaron un modelo de pronóstico de la demanda diaria de gas natural combinando MCD con redes neuronales artificiales, el cual permite actualizar la planeación de la prestación del servicio a largo plazo y sirve de soporte para la toma de decisiones relacionadas con emergencias y construcción de unidades adicionales. Papageorgiou, Markinos y Gemptos [8] aplicaron MCD para el monitoreo del comportamiento de cultivos de algodón, con lo que determinaron cuáles eran los terrenos mejor acondicionados para la producción de cierto tipo de algodón dada la disposición del terreno e identificaron las variables que afectan el rendimiento del cultivo, generando así cambios en sus características.

En el área del bienestar empresarial y los recursos humanos, los MCD han sido aplicados en el mejoramiento de la efectividad del sistema de gestión de salud y seguridad en el trabajo, facilitando la identificación del criterio crítico del proceso [9]. También se han usado MCD para facilitar la clasificación de los conocimientos asociados a la gestión de los proyectos [10]. En el área de la medicina, se han implementado MCD para la prevención de neumonía en pacientes [11].

En el control de la producción, también se han encontrado aplicaciones de MCD en el proceso de producción de bioetanol, donde se pudieron identificar los factores más relevantes para reducir los costos y facilitar la fabricación de dicho combustible [12]. También, se han aplicado para controlar la producción de una planta de dimetil tereftalado (DMT), facilitando la ejecución del plan de producción, el cual tenía grandes incertidumbres, variable no medidas y estados no definidos [13].

Contextualización de bebidas carbonatadas

Las bebidas carbonatadas son bebidas no alcohólicas y no fermentadas, elaboradas por disolución de gas carbónico (CO_2) en agua tratada lista para el consumo humano directo, con adición o no de edulcorantes naturales, artificiales o ambos, jugos de fruta, concentrados de frutas y aditivos permitidos por la legislación nacional vigente o en su defecto por el Codex alimentario [14]. Uno de los ingredientes principales y el encargado de dar a la bebida su mayor característica es el dióxido de carbono, un gas incoloro, ligeramente tóxico e inodoro con un sabor ácido; es un componente del aire, aunque se encuentra en un porcentaje muy bajo, formado por combustión y procesos

biológicos como la descomposición del material orgánico, la fermentación y la digestión [15].

La carbonatación es el proceso mediante el cual se le agrega CO_2 a la bebida con la ayuda de un equipo llamado carboenfriador, en el cual se realiza el proceso de carbonatación mediante la aplicación a presión del CO_2 en el líquido, el cual debe mantenerse a bajas temperaturas (aproximadamente 2°C) [15]. La absorción del CO_2 se hace a través de una operación conocida como absorción gaseosa, en la cual una mezcla gaseosa entra en contacto con un líquido con el fin de que este último absorba uno o más componentes del gas, cuyo resultado es una solución de esto en el líquido [16].

Debido a lo anterior, la carbonatación de bebidas es un proceso que requiere un control estricto de las variables incidentes en la característica de calidad principal del producto final: el contenido de CO_2 en la bebida. Así, el desarrollo de un modelo basado en MCD contribuye a la generación de conocimiento en esta área y se convierte en un aporte fundamental al modelado de la calidad de procesos aplicando técnicas computacionales avanzadas.

Metodología

La metodología utilizada consta de cinco etapas (figura 2): la primera consistió en la determinación de las variables del proceso; la segunda, en realizar el análisis de correlación y la matriz de adyacencia; la tercera, en elaborar el mapa cognitivo difuso del proceso de carbonatación; la cuarta, en la ejecución del modelo a través del proceso de inferencia; y la quinta, en la validación de resultados a través del análisis de convergencia de la simulación.

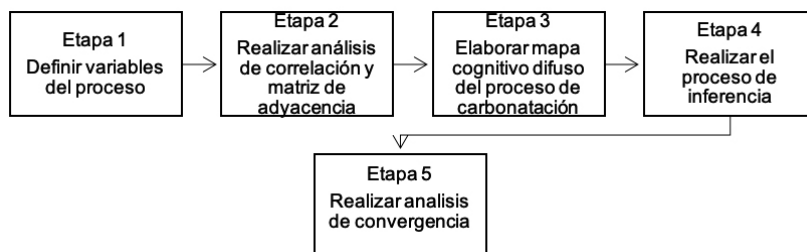


Figura 2. Metodología de la investigación

Fuente: elaboración propia

Resultados

Etapa 1: Definir las variables del proceso

A través del estudio del proceso de carbonatación y llenado, se determinó que las variables a considerar en el modelo son las descritas en la tabla 1.

Etapa 2: Análisis de correlación múltiple y matriz de adyacencia

Para la determinación de los valores de las interrelaciones entre las variables del modelo, luego del muestreo, se realizó un análisis de correlación múltiple, cuyos resultados determinaron la elaboración de la matriz de adyacencia (tabla 2).

Tabla 1. Variables del proceso

Variable	Unidad de medida	Variable	Unidad de medida
(C1) Flujo de CO ₂ (SCFM)	Ft ³ /min	(C5) Presión de la llenadora	PSI
(C2) Presión del carboenfriador	PSI	(C6) Temperatura de la bebida en llenadora	°C
(C3) Presión de succión de amoníaco	PSI	(C7) Velocidad de la llenadora	Botellas/minuto
(C4) Temperatura de la bebida en el carboenfriador	°C	(C8) Volumen de CO ₂ en la bebida	Volúmenes

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Matriz de adyacencia

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	Flujo CO ₂		1		-0,76	0,98	0,9	-0,15	1
C2	Presión carboenfriador				-0,74	0,99	0,88		1
C3	Presión succión NH ₃	0,2	-0,5		1		1	0,9	0,9
C4	Temperatura carboenfriador	-1	1			-0,7	1	-0,5	1
C5	Presión llenadora		1		0,7		0,9	-0,1	0,1
C6	Temperatura llenadora					0,8		-0,2	1
C7	Velocidad llenado	1	1	1	1		-1		0,1
C8	Vol. CO ₂								

Fuente: elaboración propia

Etapa 3: Elaborar mapa cognitivo difuso del proceso

En la figura 3, se muestra el MCD desarrollado representando las variables y el peso de las interrelaciones entre ellas, a partir de lo establecido

en la matriz de adyacencia (tabla 2). En la tabla 3, se muestran los valores de la centralidad de las variables del proceso representadas en el MCD de la figura 3, la cual corresponde a la sumatoria de los valores de los arcos entrantes y salientes en cada nodo (variable).

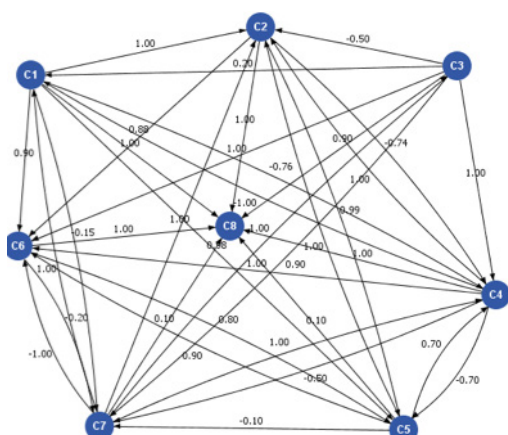


Figura 3. Mapa cognitivo difuso del proceso de carbonatación
Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Resultados de centralidad del MCD

Variables	Entradas	Salidas	Centralidad	Tipo
C1	2,2	4,79	6,99	Ordinario
C2	4,5	3,61	8,11	Ordinario
C3	1	4,5	5,50	Ordinario
C4	4,2	5,2	9,40	Ordinario
C5	3,74	2,8	6,54	Ordinario
C6	5,68	2	7,68	Ordinario
C7	1,85	5,1	6,95	Ordinario
C8	5,1	0	5,10	Receptor

Fuente: elaboración propia

Etapa 4: Proceso de inferencia

En este modelo, el proceso de inferencia se desarrolló realizando simulaciones WHAT- IF y la regla de activación de Kosko con memoria propia [17]:

$$A_i^{k+1} = f(A_i^k + \sum_{j=1}^N j \neq i A_j^k w_{ji}) \quad (1)$$

En la figura 4, se muestra que las variables convergen rápidamente a un estado estable, lo cual es deseado para el tipo de proceso en análisis. Debido a las características del proceso modelado, se estableció el criterio de detección en un punto o valor fijo, ya que esto facilita el control de la calidad del estado final del producto, facilitando la toma de decisiones.

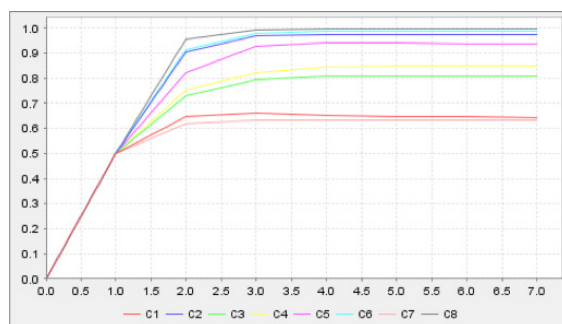


Figura 4. Resultados del proceso de inferencia

Fuente: elaboración propia

Etapa 5: Análisis de convergencia

En la tabla 4, se muestran los valores de los conceptos en el último paso de la simulación y su orden, lo que permite identificar las variables que más influyen en el proceso y en la característica de calidad del producto (volumen de CO₂ de la bebida).

Tabla 4. Orden final de variables del modelo

Variables		Orden	Valor	Tipo
C8	Concentración de CO ₂	1	0,9952	Receptor
C6	Temperatura de la llenadora	2	0,9865	Ordinario
C2	Presión carboenfriador	3	0,9743	Ordinario
C5	Presión de la llenadora	4	0,9387	Ordinario
C4	Temperatura carboenfriador	5	0,8506	Ordinario
C3	Presión succión NH ₃	6	0,8089	Ordinario
C1	Flujo del CO ₂	7	0,6433	Ordinario
C7	Velocidad de la llenadora	8	0,6339	Ordinario

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Se desarrolló un modelo para el control de calidad de procesos basado en mapas cognitivos difusos, el cual fue aplicado en una empresa productora de bebidas carbonatadas. A partir de los datos obtenidos por medio de muestreo, se encontró que las variables más influyentes para garantizar niveles de CO_2 óptimos en la bebida fueron la temperatura de la llenadora, la presión del carboenfriador y la presión

de la llenadora, lo que facilitará en un futuro el control de la calidad y los métodos de producción de este producto.

Referencias

- [1] J. Dickerson y B. Kosko, "Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps", *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 3, n.º 2, pp. 173-189, 1994. doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.173>
- [2] M. Gutiérrez, *Conceptos administrativos del control total de la calidad*, Ciudad de México: Limusa, 2007.
- [3] J. Evans, T. Foster y K. Linderman, "A Content Analysis of Research in Quality Management and a Proposed Agenda for Future Research", *Qual. Manag. J.*, vol. 21, n.º 2, pp. 17-44, 2014. doi: <https://doi.org/10.1080/10686967.2014.11918383>
- [4] E. Bourgani, C. Stylios, G. Manis y V. Georgopoulos, "Fuzzy Cognitive Maps Modeling and Simulation", *Proc. Eur. Model. Simul. Symp.*, pp. 561-570, 2013. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21326-7_27
- [5] Y. Huang, C. Feng, W. Yeh y L. Lin, "A Fuzzy Cognitive Map Modeling to Explore the Operation Dynamics of Third-party Logistics Providers", presentado en *International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*, Harbin, China, 9-10 de enero, 2010.
- [6] E. Papageorgiou, K. Aggelopoulou, T. Gemtos y G. Namos, "Yield Prediction in Apples using Fuzzy Cognitive Map Learning Approach", *Comput. Electron. Agric.*, vol. 91, pp. 19-29, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.11.008>
- [7] K. Poczeta y E. Papageorgiou, "Implementing Fuzzy Cognitive Maps with Neural Networks for Natural Gas Prediction", *IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, Volos, Grecia, 5-7 de noviembre, 2018.
- [8] E. Papageorgiou, A. Markinos y T. Gemptos, "Application of Fuzzy Cognitive Maps for Cotton Yield Management in Precision Farming", *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, n.º 10, pp. 12399-12413, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.04.046>
- [9] A. Skład, "Assessing the Impact of Processes on the Occupational Safety and Health Management System's Effectiveness using the Fuzzy Cognitive Maps Approach", *Saf. Sci.*, vol. 117, pp. 71-80, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.021>
- [10] D. Case y C. Stylios, "Fuzzy Cognitive Map to Model Project Management Problems", presentado en *35th Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, El Paso, Texas, Estados Unidos, 31 de octubre - 4 de noviembre, 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/NAFIPS.2016.7851612>
- [11] E. I. Papageorgiou y D. K. Iakovidis, "Towards the Construction of Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps for Medical Decision Making", presentado en *9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine, Larnaca*, Cyprus, 4-7 de noviembre, 2009.
- [12] A. Konti y D. Damigos, "Exploring Strengths and Weaknesses of Bioethanol Production from Bio-waste in Greece using Fuzzy Cognitive Maps", *Energy Policy*, vol. 112, pp. 4-11, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.053>
- [13] N. Christova, P. Groumpos y C. Stylios, "Production Planning for Complex Plants using Fuzzy Cognitive Maps", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, n.º 3, pp. 81-86, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37739-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37739-X)
- [14] Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec), *Norma Técnica Colombiana 2740 "Bebidas no alcohólicas, bebidas gaseosas o carbonatadas"*, Bogotá: Icontec, 2009.
- [15] Universal Industrial Gases, Inc., "Carbon Dioxide (CO₂) Properties, Uses, Applications CO₂ Gas and Liquid Carbon Dioxide". [En línea]. Disponible: <http://www.uigi.com/carbondioxide.html>
- [16] D. Eweis, F. Abed y J. Stiban, "Carbon Dioxide in Carbonated Beverages induces Ghrelin Release and Increased Food Consumption in Male Rats: Implications on the Onset of Obesity", *Obesity Research & Clinical Practice*, vol. 11, n.º 5, pp. 534-543, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.orcp.2017.02.001>
- [17] D. Pelta y C. Cruz, *Soft Computing Based Optimization and Decision Models*, Berlín: Springer, 2018.

4. Estructuras, vías y transporte

Diagnóstico de tipología de suelos, cimentaciones y altura de pisos de Sabaneta y el cambio que genera la microzonificación 2017 en comparación con la NSR-10

Carlos Augusto Portilla Cubillos¹

Diana Patricia Urrea Ramírez²

¹ Universidad Católica Luis Amigó

² Corporación Universitaria

Remington

carlos.portillacu@amigo.edu.co

diana.urrea@remington.edu.co

Resumen

Teniendo en cuenta las tipologías de suelos que hay en el municipio de Sabaneta, así como su tipo de cimentaciones y la altura de las edificaciones construidas, se puede tener un acercamiento para encontrar condiciones de sitio mucho más ajustadas a la realidad. Con base en lo anterior, se toman en cuenta los coeficientes de aceleración y velocidad pico efectivos de diseño de la NSR-10 y la microzonificación sísmica de 2017. Se pudo determinar que con la última se desarrollan estructuras 16,6% más conservadoras que las diseñadas con la NSR mencionada; y que en esta región, por encontrarse en un aproximado de 73% en suelos tipo D, al realizar un análisis de interacción suelo-estructura, la estructura continua siendo más conservadora que la desarrollada por la NSR sin interacción. Con la metodología implementada, se llega a considerar que si este se realiza con estructuras construidas con todos sus datos estructurales, de cimentación y de estudio de suelos del municipio, se encontrarían valores más acercados a la realidad del comportamiento que podrían tener las edificaciones ante la ocurrencia de un evento sísmico.

Palabras clave: estructura, interacción, mecánica de los suelos, microzonificación, zona sísmica.

Introducción

Para garantizar la regularidad de una estructura en una región propensa a eventos sísmicos, es importante conocer la intensidad de los movimientos del terreno, los cuales se pueden presentar en un espacio de tiempo determinado [1]. La norma sismorresistente colombiana es clara cuando expresa: “Debe realizarse una exploración del subsuelo en el lugar en que se va a construir la edificación, complementada con una consideración de sus alrededores para detectar, de ser el caso, movimientos de suelo. El alcance de la exploración y el programa de ensayos de laboratorio se establecen en el Título H - Estudios Geotécnicos. El ingeniero geotecnista debe elaborar un informe en el cual relacione la exploración y los resultados obtenidos en el laboratorio, se den las recomendaciones que debe seguir el ingeniero estructural en el diseño de la cimentación y obras de contención, la definición de los efectos sísmicos locales, los procedimientos constructivos que debe emplear el constructor, y los aspectos especiales a ser tenidos en cuenta por el supervisor técnico. En el reporte se deben indicar los asentamientos esperados, su variabilidad en el tiempo y las medidas que deben tomarse para no afectar adversamente las construcciones vecinas” [2].

De tal modo, el modelamiento del comportamiento de las estructuras ante eventos sísmicos es complejo y los avances científicos aún no han definido un único procedimiento para ello [3]. Es por esto que seguirán surgiendo nuevas formas de modelar sistemas estructurales y evaluar su interacción con las microzonificaciones realizadas en cada área urbana, las cuales buscan diseñar construcciones más seguras y económicas, y ajustados a la economía de la región que siempre seguirá siendo el principal factor de análisis.

En el contexto anterior, no es solo importante analizar el suelo en el área donde se va a desarrollar el proyecto, sino que también se debe conocer el entorno de este, la estructura y la interacción entre ambos, para que se dé un diseño seguro entre los ingenieros geotécnicos, los ingenieros estructurales y la intervención, entre otros profesionales que participan en el desarrollo del proyecto planeado. Para evaluar esta interacción, se han realizado microzonificaciones sísmicas en varias regiones de Colombia; y así mismo la norma sismorresistente de 2010 la exige para centros urbanos con más de 100 000 habitantes.

El estudio para evaluar los cambios que generaría la aplicación de la microzonificación de 2017 en el área metropolitana del Valle de Aburrá se llevó a cabo en el municipio de Sabaneta (Antioquia), el cual se encuentra al sur del municipio de Medellín, cuenta con 15 km² de área, donde aproximadamente el 67% está urbanizado, y se encuentra en una zona sísmica intermedia según la NSR-10.

Metodología

Con el fin de evaluar y obtener un diagnóstico de la tipología de suelos de Sabaneta y el cambio que puede generar el uso de la microzonificación de 2017 en comparación con el reglamento colombiano de construcción sismorresistente, se selecciona un tipo de estructura acorde a las tipologías de alturas más representativas del municipio en mención, de acuerdo con los datos recolectados en el proceso investigativo.

Se procede a realizar el análisis de los datos con el fin de encontrar tipologías de suelos predominantes, alturas de las construcciones notorias, tipos de cimentaciones, capacidad portante de los suelos y profundidad de la cimentación.

Luego de obtener los datos y analizar sus tendencias, se procede a escoger una construcción tipo de las que se encontraron en la recolección de datos, de la cual se tomaron los datos básicos: se escogió el suelo tipo D, estructura de pórticos de nueve pisos, grupo de uso 1. Las variaciones de las estructuras planteadas estuvieron principalmente en el cambio de área de acuerdo con su altura, y el modelamiento estructural está compuesto de vigas de 0,40 x 0,40 m y columnas de 0,40 x 0,50 m (figura 1).

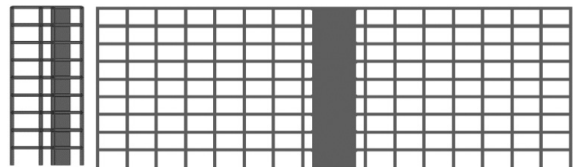


Figura 1. Modelamiento de estructura a evaluar

Fuente: elaboración propia realizada por sistema de cómputo

Tras tener las estructuras tipo a evaluar, se procedió a realizar sus cálculos siguiendo los lineamientos indicados por la NSR-10 como se plantea a continuación:

- Suelo Tipo D $Aa \leq 0,1$ (1)
 Suelo Tipo D $Aa = 0,2$ (2)
 Suelo Tipo D $Aa = 0,3$ (3)

Valores del coeficiente Fa para la zona de periodos cortos del espectro, donde Aa es el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño:

- Suelo Tipo D $Av \leq 0,1$ (4)
 Suelo Tipo D $Av = 0,2$ (5)
 Suelo Tipo D $Av \leq 0,1$ (6)

Valores del coeficiente Fv para la zona de periodos intermedios del espectro, donde Av es el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño:

$$Ta = C_t h^a \quad (7)$$

Alternativa para encontrar la aproximación al periodo fundamental de la estructura:

$$Sa = 2,5AaFaI \quad (8)$$

Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado. Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un periodo de vibración T , donde I representa el coeficiente de importancia:

$$Tc = 0,48 \frac{AvFv}{AaFa} \quad (9)$$

Periodo de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño para periodos cortos y su parte descendente:

$$To = 0,1 \frac{AvFv}{AaFa} \quad (10)$$

Periodo de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones:

$$Vs = m * Sa/g \quad (11)$$

$$Vsi \geq 0,7 Vs \quad (12)$$

Resultados

Al referenciar los datos obtenidos de 156 tipos de construcciones que existen en el inventario de la Secretaría de Planeación Municipal de Sabaneta, se conoció que el suelo que se presenta en esta región está constituido en un alto porcentaje como suelos tipo D según lo reglamentado por la NSR 10 en su “tabla A.2.4-1 clasificación de los perfiles de suelo” [2], seguido por el suelo tipo C y E sin que se presentaran tipo A, B y F como sería de esperarse teniendo en cuenta su ubicación con referencia al río Medellín y las pendientes que llegan desde el oriente del río.

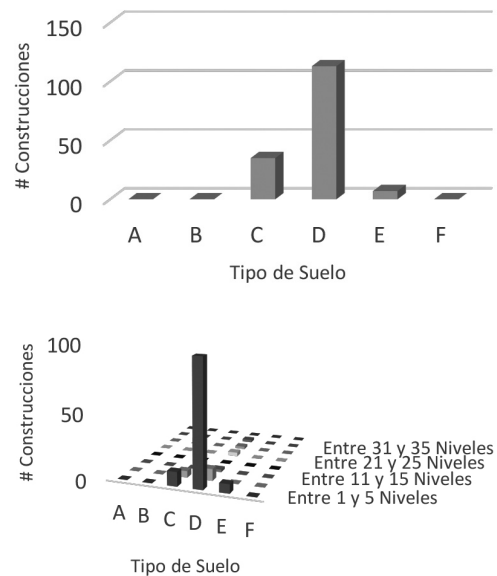
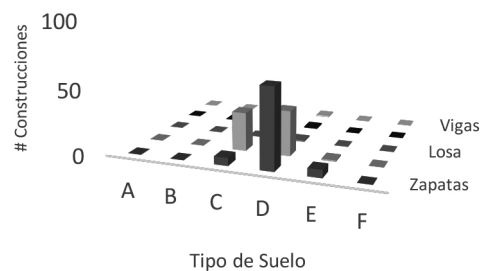


Figura 2. Tipología de suelos versus cantidad de construcciones

Fuente: elaboración propia con datos de Planeación Municipal



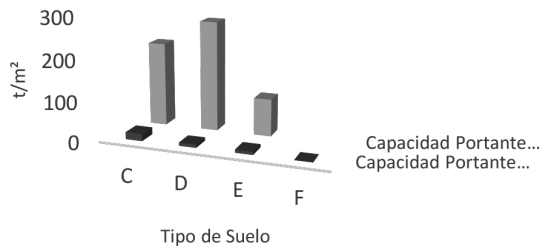


Figura 3. Tipología de cimentaciones versus suelos

Fuente: elaboración propia con datos de Planeación Municipal

El periodo es el tiempo necesario que necesita una estructura para cumplir su ciclo completo de movimiento oscilatorio [4], estos están generalmente entre 0,1 y 5 en estructuras flexibles. En el caso de la edificación referenciada anteriormente, arrojó un periodo en primera instancia como T_a de 0,91 utilizando la ecuación (7) y $C_u T_a$ de 1,25, con el sistema de cómputo 1,06 con el cumplimiento exigido por la norma sismorresistente colombiana.

Tabla 1. Correlación microzonificación de 2017 y NSR-10

Municipio	Mz-2017		NSR-10	
	Aa	Av	Aa	Av
Sabaneta	0,18	0,24	0,15	0,20

Fuente: [5]

Las estructuras construidas en Colombia deben ubicarse en una zona de amenaza sísmica según la NSR-10. Para el caso evaluado (el municipio de Sabaneta), el coeficiente que representa la aceleración efectiva de diseño (A_a) en la microzonificación de 2017 presenta un valor 10% mayor que la que presenta la última NSR, lo cual muy seguramente influirá en el compromiso sísmico de la estructura que se ve reflejado en su variación del cortante basal. Del mismo modo, el coeficiente que representa la velocidad pico efectiva de diseño (A_v) presenta un aumento del 16,6%, que influirá notablemente en el comportamiento dinámico de la estructura.

Tabla 2. Cortantes basales entre microzonificación de 2017 y nsr-10

Municipio	Mz-2017				nsr-10			
	Fa	Fv	Sa	Vs(t)	Fa	Fv	Sa	Vs(t)
Sabaneta	1,2	1,55	0,72	6241	1,2	1,6	0,6	5200,8

Fuente: elaboración propia con base en [5] [2]

Como era de esperarse, los cambios de los coeficientes de aceleración y velocidad de diseño han arrojado como resultado un cambio notorio en el cortante basal con un aumento del 16,6%. Entre el que se presenta actualmente con la NSR-10 y el que se presentaría en caso de ser aprobado, hay que tener en cuenta la microzonificación de 2017. Por lo anterior, con la última mencionada se construirían estructuras mucho más reservadas.

Teniendo en cuenta que la estructura se encuentra en un suelo tipo D, se plantea hacer un análisis de interacción en el que se puedan calcular los cambios en el cortante basal aplicando el valor mínimo 0,7V, que se puede hacer más detallado como se plantea en el apéndice A-2 de la NSR-10.

Tabla 3. Cortantes basales con ISE Mz-2017 y NSR-10

Municipio	Mz-2017 Vs(t)	Vs(t) con NSR-10
Sabaneta	4368,7	3640,56

Fuente: elaboración propia

La interacción suelo-estructura es recomendada en los códigos sísmicos más avanzados [6], sobre todo en países donde predominan los suelos blandos, como es el caso de Ciudad de México principalmente. Por lo anterior, el aumento del periodo fundamental de una estructura y el cambio del amortiguamiento asociado con la interacción suelo-estructura es un tema ampliamente estudiado [7]; sin embargo, la norma nsr-10 al respecto es poco profunda en la actualidad.

De otra parte, de acuerdo con los datos recolectados, se puede valorar el efecto del piso débil en las estructuras consultadas; estos problemas estructurales se presentan cuando el primer piso de un edificio tiene una rigidez menor en comparación con el siguiente nivel [8]. Este efecto podría estar presente en estructuras entre uno y diez pisos, que por su antigüedad constructiva pueden ser más vulnerables debido a que el primer piso es usado como parqueaderos abiertos, con aumento de masas en los niveles superiores de la estructura y cambios de rigideces notorias. Este caso también está en estudio en la investigación en desarrollo.

Conclusiones

Quedó demostrado que al aplicar los coeficientes de la microzonificación de 2017, las estructuras mostrarán un comportamiento del 16% más conservador que el de la NSR-10.

En la zona urbana del municipio de Sabaneta, se presentan tres tipologías de suelos según los lineamientos de la norma sismorresistente colombiana, que son suelos tipo C, D y E, siendo el tipo D el de mayor proporción con 73%, el suelo tipo C tiene 23% mientras que el suelo tipo E es el de menor representación con 4%. En la región, no se presentaron suelos tipo A, B ni F.

Teniendo en cuenta un referente de alturas de las edificaciones con respecto al suelo donde fueron construidas, se evidenció que: el 73% tiene entre 1 y 5 niveles, con 84% de ellos construidos en suelo tipo D; el 9% tiene entre 6 y 10 niveles, con 64,2% de ellos construidos en suelo tipo D; el 6,4% tiene entre 11 y 20 niveles, con 100% de ellos construidos en suelo tipo D; y el 11,6% tiene más de 20 niveles, con 61,2% de ellos sobre suelo tipo C y 38,8% sobre suelo tipo D.

En la tipología de cimentación, se encontró que la mayoría es tipo pila con 50,6%, seguido por zapatas

con 47,4% y solo 2% con otros tipos de cimentaciones. Al respecto, también se pudo evidenciar que el suelo tipo D es el de mayor proporción en los dos tipos de cimentaciones, con un porcentaje mayor para zapatas, lo cual es de esperarse debido a que la mayor proporción de estructuras están entre 1 y 5 pisos.

Referencias

- [1] Comité AIS-300 Amenaza Sísmica, *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2019*, Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009.
- [2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes NSR-10, Ley 400 de 1997 (Modificada ley 1229 de 2008)*. Decreto 926 del 19 de marzo del 2010, Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.
- [3] M. A. Mora, J. D. Villalva y E. Maldonado, "Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal", *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 5, n.º 9, 2006.
- [4] J. C. Botero, *Dinámica de estructuras sistemas de un grado de libertad*, Medellín: Editorial Universidad Eafit, 2011.
- [5] Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes y Área Metropolitana del Valle de Aburrá, *Armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín*, Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2017.
- [6] Applied Technology Council (ATC), "Disposiciones provisionales para el desarrollo de reglamentos sísmicos para edificios, ATC-3-06", California: ATC, 1984.
- [7] P. Jennings y J. Bielak, "Dinámica de interacción suelo-edificio", *Bulletin of the Seismological Society of América*, vol. 77, n.º 6, 1973.
- [8] J. Aviles, "Efecto de interacción suelo estructura en edificios con planta baja blanda", *Revista de Ingeniería Sísmica*, n.º 79, 2008.

Determinación del efecto de la incorporación de diferentes polímeros termoplásticos en el desempeño ambiental de mezclas de asfalto

Daniela Andrea Monterrosa Álvarez
Harveth Hernán Gil Sánchez

Politécnico Colombiano Jaime
Isaza Cadavid
1daniela14monterrosa@gmail.com

Resumen

Dado que el asfalto es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo y que los polímeros son la tercera fuente principal de desechos, existe la posibilidad de disminuir materiales y reincorporar los polímeros al ciclo de vida, utilizándolos en el asfalto como agregados pétreos. Por esta razón, se estudió el desempeño ambiental del polipropileno (PP), el poliestireno (PS) y el polietileno de baja densidad (LDPE), en porcentajes de adición de 3,6 y 12% para mezclas asfálticas. El contenido de asfalto seleccionado fue 5,4%, ya que es un valor común desde el punto de vista de mezclas óptimas. Se estimó el desempeño ambiental de las mezclas asfálticas mediante el cálculo de la energía incorporada (MJ) y la huella de carbono (kg) en las fases de material, procesamiento y fin de la vida. De acuerdo con los resultados, la fase que más consume energía incorporada y huella de carbono fue la extracción de materiales. Cuando se compararon los diferentes termoplásticos, se encontró que el PS exhibe el total mayor de energía incorporada y de CO₂, mientras que el PP mostró los menores valores de energía y el LDPE tuvo las menores emisiones de CO₂. La recuperación de energía con respecto al reciclaje presentó valores para adiciones del 12% de 6,52, 6,96 y 6,57% para PP, LDPE y PS, respectivamente, y para la huella de carbono presentó valores de 9,10, 8,31 y 8,51% para PP, LDPE y PS, respectivamente, lo que sugiere que hay un potencial de reducción de energía y huella de carbono considerable para este tipo de mezclas.

Palabras clave: asfalto modificado, ciclo de vida, energía incorporada, huella de carbono, polímeros termoplásticos.

Introducción

Encontrar un uso adecuado para los residuos de polímeros desechados es una necesidad que se tiene hoy en día [1]. Su alta resistencia a la degradación los convierte en residuos difíciles de eliminar y, por tanto, en un grave problema ambiental [2]. Después del desperdicio de alimentos y de papel, los desechos plásticos son la tercera fuente principal de los desechos municipales e industriales en las ciudades [3]. Incluso las ciudades con bajo crecimiento económico han comenzado a producir más desechos de plástico debido al mayor uso de envases, bolsas de compras, botellas y otros productos que usan polímeros [3]. Según estadísticas del 2013, 20% del volumen de los residuos domiciliarios recolectados son plásticos y en los últimos años ese consumo ha aumentado [4].

Por otro lado, en Colombia, según el Instituto Nacional de Carreteras, más del 43% y del 90% de las carreteras con y sin pavimento, respectivamente, son regulares y están en mal estado. Para el año 2018, el Gobierno colombiano destinó USD 4,9 billones para inversión en infraestructura de transporte [5]. Estos datos soportan la necesidad de construcción de carreteras con resistencia y materiales duraderos, siendo una posibilidad la reutilización de materiales de desecho de tipo polimérico [6], [7].

Mroueh, Eskola y Laine-Ylijoki [8] hicieron una evaluación del ciclo de vida (LCA) de los pavimentos utilizando asfalto reciclado como base y obtuvieron mayores beneficios ambientales, ya que consumían menor cantidad de energía y emitían cantidades más bajas de NO_x , SO_2 , CO_2 y compuestos orgánicos volátiles. Por su parte, Donalson, Curtis y Najafi [9], en su estudio del LCA del asfalto reciclado, encontraron que su uso podría tener efectos positivos significativos en el medio ambiente, los cuales pueden maximizarse aún más mediante el reciclaje.

Reza [10] analizó el costo del ciclo de vida del uso de agregado reciclado en el pavimento, y concluyó que el pavimento con agregado reciclado tiene un rendimiento similar al pavimento del asfalto. Santos *et al.* [11] mostraron que el polímero EVA como modificador del asfalto originaba un deterioro del perfil del ciclo de vida de la estructura del pavimento.

Balaguera *et al.* [12] hicieron una revisión de la literatura en cuanto a asfaltos modificados con polímeros y encontraron que la categoría de impacto que más se ha estimado es la energía y el calentamiento global.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la incorporación de polipropileno (PP), poliestireno (PS) y polietileno de baja densidad (LDPE) como agregados pétreos en el desempeño ambiental de mezclas de asfalto modificadas. Dicha estimación se realizó por medio del cálculo de la energía incorporada y la huella de carbono a partir de datos reportados en la literatura, siendo esta una investigación explicativa. El límite escogido del sistema para el desempeño ambiental incluye las fases de materiales, manufactura y fin de la vida del compuesto.

Metodología

Todos los cálculos ambientales se estimaron teniendo en cuenta un cemento asfáltico con un grado de penetración de 80-100, el cual se usa habitualmente en Colombia. El contenido óptimo de asfalto se consideró como 5,4% (porcentaje en peso de la mezcla), cantidad frecuente encontrada en este tipo de asfaltos [12], con el que se puede obtener un buen comportamiento de la mezcla. Las adiciones de los materiales poliméricos a la mezcla asfáltica se escogieron teniendo en cuenta los resultados de Hussein *et al.* [13], quienes trabajaron asfaltos modificados con LDPE. Además, para dicha comparación ambiental se seleccionaron polímeros como el PP, el PS y el LDPE, que se producen en buena cantidad en la ciudad de Medellín. Tres mezclas con diferentes adiciones de polímeros fueron consideradas (3, 6 y 12% en peso del cemento asfáltico).

En la figura 1, se presenta un diagrama de flujo de la producción de asfalto. La unidad funcional utilizada en el análisis es 1 m^3 de mezcla asfáltica. La densidad volumétrica se estimó como 2538,8 kg/m^3 , que es el máximo valor de la gravedad específica de una mezcla asfáltica sin compactar a 25 °C de acuerdo con la norma INV E-735-07. Según dichos valores, el valor de la masa de cemento asfáltico se estimó en 137,1 kg y la masa de agregado en 2401,8 kg.

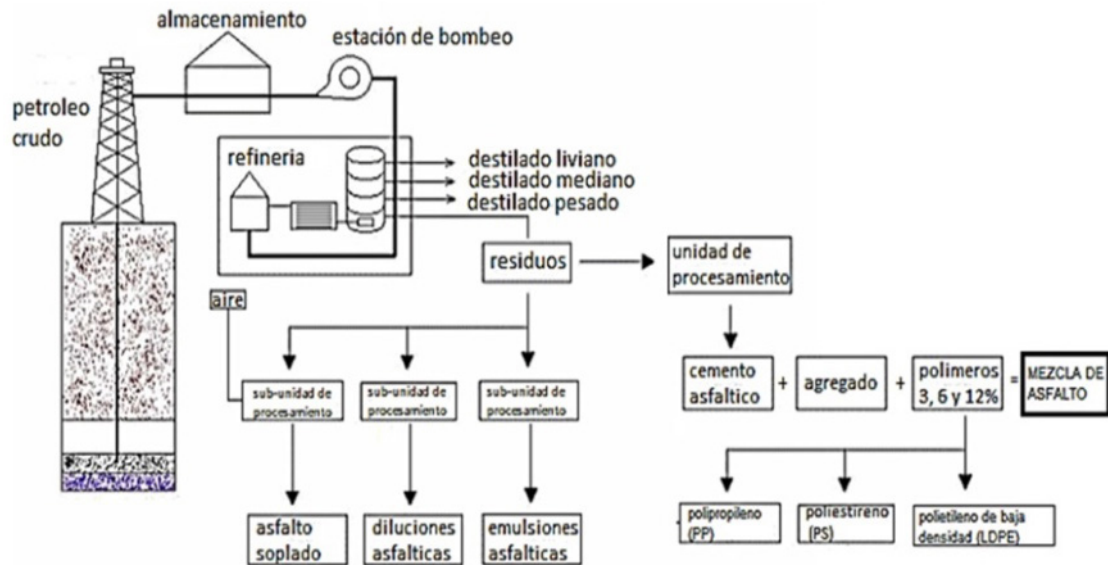


Figura 1. Diagrama de flujo de la producción de mezcla de asfalto

Fuente: tomado y modificado de [14]

El desempeño ambiental de los asfaltos modificados se evaluó mediante la estimación de la energía incorporada (MJ) y la huella de carbono (kg CO₂) durante las fases de materia prima, procesamiento y fin de la vida (EOL - *end of life*). Estas ecopropiedades se pueden apreciar en la tabla 1. La etapa de material tiene en cuenta la extracción de materias primas

hasta su transformación en material de entrada del asfalto; la etapa de proceso del material incluye cada paso en el proceso de fabricación de materiales; y la etapa EOL considera la recuperación de energía. La disposición final del material tiene varias rutas, incluyendo disposición en vertedero, reciclaje e incineración.

Tabla 1. Ecopropiedades de los materiales y procesos

Componente	Producción del material		Procesamiento		Reciclaje		Ref
	Energía incorporada, H_m (MJ/kg)	Huella de carbono, C_m (kg/kg)	Energía incorporada, H_p (MJ/kg)	Huella de carbono, C_p (kg/kg)	Energía incorporada, H_{RC} (MJ/kg)	Huella de carbono, C_{RC} (kg/kg)	
Agregado	0,125	0,0055	0	0	0,08125	0,003575	[13], [14]
Cemento asfáltico	2,41	0,14	6	0,002	1,5665	0,091	[15]
PP	79	3,05	21,5	1,6	50	2,1	[14], [15]
LDPE	81	2,75	23,9	1,8	50	2,85	[14], [15]
PS	97	3,8	17,4	1,305	47,5	2,85	[15]

Fuente: elaboración propia

En este estudio, se consideró el reciclaje como ruta final del material, por lo que se estimó el EOL como recuperación de energía. El EOL se calcula de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2), como se muestra a continuación:

$$\tilde{H} = RH_{RC} + (1 - R)H_m \text{ (MJ/MJ)} \quad (1)$$

$$\tilde{C} = RC_{RC} + (1 - R)C_m \text{ (kg/kg)} \quad (2)$$

Donde $\tilde{H}$ es la energía involucrada efectiva, $\tilde{C}$ es la huella de carbono efectiva, H_m es la energía incorporada del material de producción primaria, C_m es la huella de carbono del material de producción primaria, H_{RC} y C_{RC} son los valores correspondientes para energía y huella de carbono del material reciclado, y R es el contenido de reciclado del material al comienzo de la vida. Luego, se determina el potencial EOL de la siguiente manera:

$$\text{EOL energía: } r(\tilde{H} - H_{RC}) \quad (3)$$

$$\text{EOL carbono: } r(\tilde{C} - C_{RC}) \quad (4)$$

Donde r es la fracción de reciclado al final de la vida. En este estudio se consideró R como 0 y r se obtuvo de los valores reportados por Ashby [16].

Resultados

En la figura 2, se presenta la energía incorporada obtenida para las diferentes mezclas asfálticas durante las fases de materia prima, procesamiento y EOL. Se puede apreciar que el proceso que más energía incorporada consume es el de extracción de materiales. Conforme se adiciona más material polimérico, la energía incorporada del material aumenta. El PS evidencia una mayor energía incorporada en todos los casos, mientras que el LDPE y el PP muestran energías muy similares. En cuanto a la manufactura, el material que más energía consume es el LDPE, seguido del PP y luego del PS, y se evidencia mucha mayor diferencia para 12% de adición. Finalmente, se pudo determinar que la energía que se recupera al reciclar el material al final de la vida útil es muy similar en todos los casos, con poca variación de los datos.

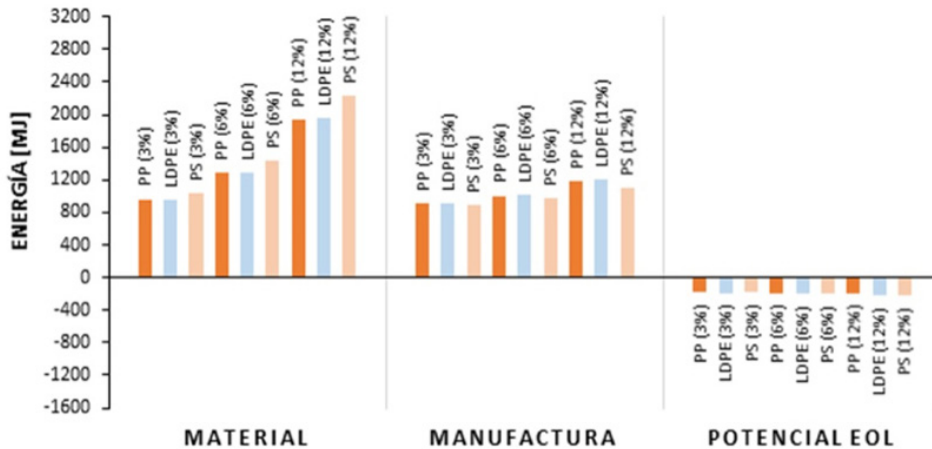


Figura 2. Energía incorporada para diferentes procesos de una mezcla asfáltica

Fuente: elaboración propia

En la figura 3, se presenta la huella de carbono obtenida para las diferentes mezclas asfálticas durante las mismas tres fases. Como en el caso de la energía, la fase que más huella de carbono genera es la extracción de material. El PS es el material que más cantidad de CO_2 emite durante la extracción, seguido por el PP y el LDPE. En el proceso de

manufactura, el que más generó CO_2 fue el LDPE, seguido del PP y finalmente el PS, que fue el que menos generó de los tres en todos los casos; al igual que con la energía incorporada, con la huella de carbono también se produce un ahorro al calcular el potencial EOL, el cual en los tres casos para los tres porcentajes trabajados fue muy similar.

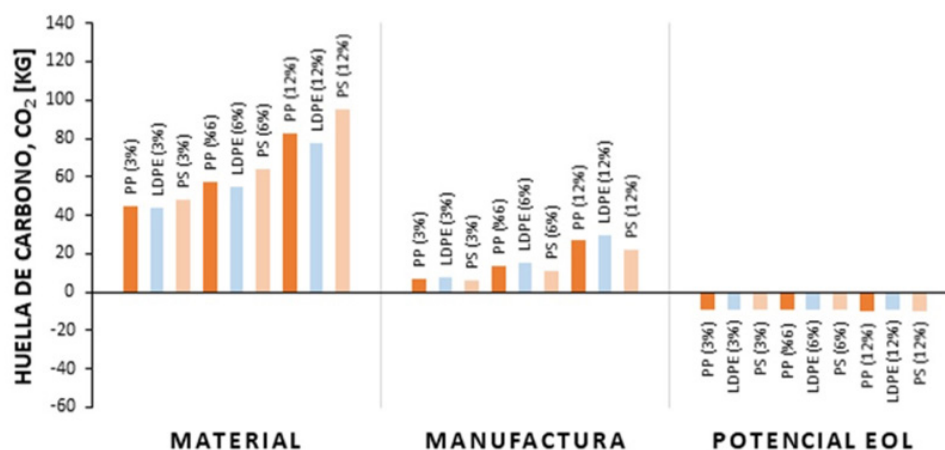


Figura 3. Huella de carbono para los diferentes procesos en una mezcla de asfalto

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Los polímeros termoplásticos han sido usados en mezclas asfálticas debido a que incrementan la rigidez de las mezclas y mejoran la cohesión. Además de las propiedades físicas y mecánicas, los resultados obtenidos acerca de los polímeros termoplásticos como adición en mezclas asfálticas muestran que puede ser ventajoso desde el punto de vista ambiental. Se encontró que el PS evidencia el total de consumo de energía y emisión de CO_2 mayor en todos los casos, mientras que el PP se desempeñó mejor en cuanto a energía y el LDPE en cuanto a CO_2 .

Al analizar los resultados del EOL, se evidencia un potencial para reducción de energía en 6,52, 6,96, y 6,57% y de CO_2 en 9,10, 8,31 y 8,51% para el PP, el LDPE y el PS, respectivamente. Con la disposición final de reciclaje, se estaría disminuyendo el volumen de los rellenos sanitarios y ampliando la vida útil de mezclas asfálticas al reincorporar los materiales. Así mismo, se aportaría al mejoramiento de la calidad del aire con la disminución de las emisiones de CO_2 .

Referencias

- [1] R. Vasudevan, A. Ramalinga Chandra Sekar, B. Sundarakannan y R. Velkennedy, "A Technique to Dispose Waste Plastics in an Ecofriendly Way — Application in Construction of Flexible Pavements", *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, n.º 1, pp. 311-320, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>
- [2] M. Valero-Valdivieso, Y. Ortegón y Y. Uscátegui, "Biopolímeros: avances y perspectivas", *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*, vol. 80, n.º 181, pp. 171-180, 2013.
- [3] United Nations Environmental Programme (UNEP), *Converting Waste Plastics into a Resources*, Nairobi: UNEP, 2009.
- [4] N. Arellanes Servín, *Propuesta de un programa de manejo de residuos plasticos (PET) como alternativa de sustentabilidad en centros escolares de la ciudad de Tuxpan, Veracruz, México*, Veracruz: Universidad Veracruzana, 2013.
- [5] Ministerio de Hacienda y Crédito Público, *Presupuesto ciudadano 2018*, Bogotá: MinHacienda, 2018.
- [6] L. P. T. L. Fontes, G. Trichês, J. C. Pais, and P. A. A. Pereira, "Evaluating Permanent Deformation in Asphalt Rubber Mixtures", *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n.º 7, pp. 1193-1200, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.021>
- [7] Z. Z. Ismail and E. A. AL-Hashmi, "Use of Waste Plastic in Concrete Mixture as Aggregate Replacement", *Waste Manag.*, vol. 28, n.º 11, pp. 2041-2047, 2008. doi: <https://10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- [8] U.-M. Mroueh, P. Eskola y J. Laine-Ylijoki, "Life-cycle Impacts of the Use of Industrial By-products in Road and Earth Construction", *Waste Manag.*, vol. 21, n.º 3, pp. 271-277, 2001. doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00100-8)
- [9] J. Donalson, R. Curtis y F. Najafi, "Sustainable Assessment of Recycled Concrete Aggregate (RCA) used in Highway Construction", presentado en *90th Annu. Meet. Transp. Res. Board.*, Washington D.C., 23-27 de enero, 2011.

- [10] F. Reza, *Evaluation of Recycled Aggregates Test Section Performance*, Mankato: Minnesota State University, 2017.
- [11] J. Santos, V. Cerezo, K. Soudani y S. Bressi, "A Comparative Life Cycle Assessment of Hot Mixes Asphalt Containing Bituminous Binder Modified with Waste and Virgin Polymers", *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 194-199, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.046>
- [12] A. Balaguera, G. I. Carvajal, J. Albertí y P. Fullana-i-Palmer, "Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: A Literature Review", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 132, 2017, pp. 37-48, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
- [13] I. A. Hussein, H. A.-A. Wahhab y M. H. Iqbal, "Influence of Polymer Type and Structure on Polymer Modified Asphalt Concrete Mix", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 84, n.º 4, pp. 480-487, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450840409>
- [14] H. E. Ibáñez, "Uso de emulsiones en pavimentos asfálticos; asfaltos calientes y fríos", tesis doctoral, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2003.
- [15] G. Baird, A. Alcorn y P. Haslam, "The Energy Embodied in Building Materials — Updated New Zealand Coefficients and their Significance". *Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand*, vol 24, n.º 1, 2017.
- [16] G. Hammond, C. Jones, *Inventory of Carbon & Energy (ICE). Version 16a*. Bath: University of Bath, 2008.

Diseño vial con seguridad en adelantamiento

Beatriz Elena Pineda Uribe¹

John Jairo Posada Henao²

- 1 Politécnico Colombiano Jaime
Isaza Cadavid
2 Universidad Nacional de
Colombia
beatrizpineda@elpoli.edu.co

Resumen

En una carretera de dos carriles, los adelantamientos se hacen en el carril por donde circulan los vehículos que viajan en sentido opuesto. “Por lo tanto, es muy importante que se disponga de tramos donde se permita adelantar de manera segura, como resultado de un análisis riguroso y que corresponda con las características geométricas de la vía y los factores propios del entorno de cada región. Esto previene accidentes de tránsito que ocurren por causa de los adelantamientos indebidos” [1]. Para determinar dónde es posible adelantar, se debe obtener la distancia de visibilidad de adelantamiento (DVA) requerida para una carretera o para cada tramo de características homogéneas y compararlas con las distancias disponibles, y cuando estas últimas sean mayores, se permitirá el adelantamiento. En Colombia, se tienen dos manuales que permiten identificar esto: el de diseño geométrico vial y el de señalización. Después de aplicarlos en la carretera de dos carriles que va del túnel de Occidente a San Jerónimo en Antioquia, Colombia, se obtuvieron diferencias significativas en la señalización de piso y se concluyó que es necesario mejorar algunos aspectos de los manuales y que los adelantamientos deben ser proyectados desde la etapa del diseño.

Palabras clave: adelantamiento, conducción, diseño geométrico, maniobra de pasada, parada, seguridad vial.

Introducción

En carreteras de dos carriles, el adelantamiento está directamente relacionado con las altas cifras de accidentalidad y es una de las principales causas enunciadas en los informes de siniestros. En las vías sin tramos para adelantar, los conductores se arriesgan a sobrepasar a un vehículo que circula a menor velocidad en una distancia corta que no es la adecuada, por medio de maniobras inseguras que en algunos casos terminan en accidentes. Choques frontales, salidas de la vía e invasión de carril, entre otros, suelen ser las causas relacionadas con adelantamientos en zonas no adecuadas. Pese a que la frecuencia de los accidentes asociados a maniobras de adelantamiento sea inferior a la de otros tipos de maniobras, su gravedad es muy alta y es habitual que implique la muerte de los usuarios de las carreteras.

En vías ya construidas, como acciones de mejora para la poca visibilidad, se realizan rectificaciones o a veces simplemente se aumentan las distancias de visibilidad, construyendo bermas en las rectas y sobreanchos en las curvas horizontales, o aumentando la visibilidad lateral eliminando obstáculos, todo esto sin cambiar la velocidad de diseño de la vía. En términos de seguridad vial, es claro que todas estas acciones dirigidas a la prevención son muy rentables desde el punto de vista técnico, social y económico, ya que el costo de los accidentes de tránsito está siendo cada vez mayor para la sociedad en general.

Cada año mueren casi 1,3 millones de personas en las carreteras del mundo, mientras que entre veinte y cincuenta millones resultan con lesiones no mortales. Los accidentes de tránsito se han convertido en una de las principales causas de muerte, especialmente para personas entre 15 y 29 años, por lo cual es un importante problema de la salud pública [2].

En Colombia, al año se presentan más de 500 000 atenciones médicas por accidentes de tránsito cubiertas por póliza obligatoria para atención de estos incidentes; en el año 2016 se pagaron COP 960 000 millones por concepto de emergencias y auxilios funerarios [3].

Para el año 2012, la invasión de carril ocupó el cuarto puesto en las hipótesis de muertes en accidentes de tránsito en Colombia, con 459 muertos [4], entendiendo que la invasión de carril es consecuencia del deseo de adelantamiento por parte de los vehículos.

Dado que en Colombia gran cantidad de carga y pasajeros se moviliza por carreteras, de las cuales un gran porcentaje es de dos carriles [5], es muy importante disponer de oportunidades claras para adelantar con el fin de proveer un buen nivel de servicio y baja accidentalidad. La proporción de la longitud de la carretera en la que no se permite adelantar tiene correlación significativa con la accidentalidad, por lo que es aconsejable, desde el punto de vista de la seguridad, que al menos el 30% de la longitud de la carretera tenga condiciones para adelantar [6].

Entre las especificaciones que más preocupan a los diseñadores de carreteras de dos carriles están las relacionadas con radios de curvatura horizontal, longitudes de curvas horizontales, entretangencias y pendientes en su rasante; y debe ser de su interés el análisis de visibilidad que permita establecer si tal diseño es adecuado para proporcionar distancias de visibilidad de adelantamiento adecuadas y suficientes. Los manuales para diseño y señalización de carreteras en Colombia ofrecen especificaciones para dichas zonas de adelantamiento, y este estudio pretende analizarlas con el fin de contribuir al tema.

Entre los dos manuales existen diferencias significativas que conducen a distintos criterios para el trazado y la señalización. Además, hay aspectos que no están contenidos en ninguno de los dos manuales, lo cual motivó la realización de este trabajo. Con el fin de contribuir a la seguridad vial en los diseños geométricos de carreteras de dos carriles, y por ende a la circulación de usuarios, se plantea como hipótesis que es necesario acercar los criterios de uno y otro manual e incluir los aspectos que no estén contenidos en ellos y que estén involucrados en el respectivo análisis de visibilidad.

El alcance de este estudio es mostrar las diferencias entre los manuales de diseño y de señalización en Colombia, y los aspectos de diseño que pueden estar involucrados en la geometría de la carretera y en la señalización horizontal para proveer tramos de adelantamiento seguros. Algunos de estos aspectos que están incluidos en los manuales fueron revisados con fines de mejora y se incluyen nuevos puntos de vista.

Metodología

Se revisaron los dos manuales que contienen procedimientos para evaluar la distancia de visibilidad de

adelantamiento (DVA) en carreteras de dos carriles en Colombia, y se encontraron diferencias entre ellos.

El *Manual de diseño geométrico* de 2008 ha tenido como referente las especificaciones dadas en *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* de 2001 para la DVA requerida; esos valores fueron obtenidos en Estados Unidos para maniobras de un camión adelantando otro camión, por lo cual arrojan unas DVA requeridas muy largas. El *Manual de señalización vial* de 2015 toma como base los valores del *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)* de 2004, que están basados en maniobras de camión adelantando camión.

Con el fin de evaluar si las diferencias entre los manuales colombianos son significativas en la demarcación final de la carretera, se seleccionó la carretera Túnel de Occidente-San Jerónimo, que es del orden nacional, ubicada en el departamento de Antioquia, la cual tiene características muy uniformes durante todo el trayecto con curvas horizontales espiralizadas en terreno montañoso.

Se diseña la señalización de piso según cada manual para la vía de estudio, después se analizan con el fin de recomendar cuál de ellas es mejor; se establece como referente la tesis doctoral de Víctor Gabriel Valencia Alaix [7].

Resultados

Acorde con los documentos consultados, en el manual de diseño se establece que debe existir una distancia mínima entre el eje del carril interior en una curva horizontal y los obstáculos laterales como muros, talud de corte, vegetación, etc., denominada flecha (M), que permita tener distancia de visibilidad de parada (DVP) suficiente [8]. En este caso, se propone prolongar la línea de visibilidad hasta el carril contrario para así advertir la presencia de vehículo que circula en sentido contrario, como se muestra en la figura 1, y evaluar si permite al conductor realizar la maniobra de adelantamiento, cambiando DVP por DVA en los análisis numéricos.

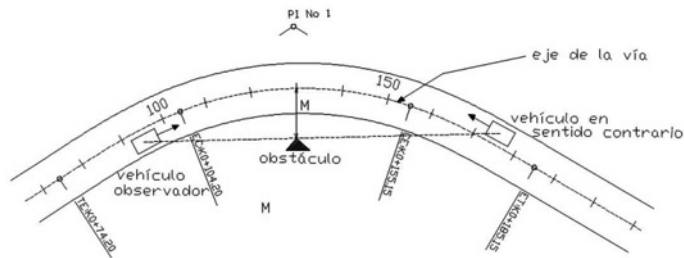


Figura 1. Flecha mínima en curvas horizontales para DVA

Fuente: elaboración propia con base en [8]

Las DVA disponibles que se miden en cada absisa, y según método de cada manual, no tienen diferencias significativas. Es así como la decisión sobre cuál de los dos manuales es mejor utilizar para proyectar mejor la señalización de dos carriles en Colombia resulta de la comparación de las DVA calculadas.

En Colombia, los adelantamientos de autos adelantando autos y autos adelantando camiones son los más frecuentes; además, el valor de la brecha crítica es de dieciocho segundos para el primer caso y de quince segundos para el segundo [7]. Con estos valores, se calcula la DVA mínima para la velocidad de operación medida en cada tramo, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de DVA (m) requeridas según manuales y estudio colombiano

Velocidad operación V_{op} (km/h)	Según manual de señalización [9]	Según manual de diseño [8]	Con brecha crítica y V_{op} según [8] Auto adelantando	
			Auto	Camión
68	200	407	340	283
83	252	407	415	345
84	254	407	420	350
91	282	407	455	379

Nota: En los tramos, la velocidad teórica en tangente horizontal es de 60km/h.

Fuente: elaboración propia con base en [7], [8] y [9]

Al comparar los valores, se observa que la DVA según el *Manual de diseño geométrico* es el valor que más se aproxima a los valores hallados en el estudio con brecha crítica. Además, el valor de referencia tomado para esta comparación a veces está por encima, con máximo 48 m de diferencia, y a veces por debajo, con 124 m.

Conclusiones

En este estudio, se ha llegado a la conclusión de que dadas las diferencias que se tienen en los manuales de señalización y de diseño geométrico y la carencia de algunos valores o procedimientos, por los cuales se termina señalizando con línea discontinua donde no se tienen elementos geométricos diseñados para permitir el adelantamiento, se deben unificar y completar los criterios de ambos manuales, y la señalización debe ser proyectada por el diseñador de la vía y plasmada en los planos de diseño y señalización.

Al revisar el *Manual de diseño geométrico*, no se encontró un procedimiento para verificar las distancias de visibilidad de adelantamiento en curvas verticales cóncavas, tampoco las longitudes mínimas de curvas verticales que cumplan con los criterios de visibilidad de adelantamiento, ni las DVA requeridas para las curvas horizontales; asuntos que deben ser incluidos en futuros manuales.

La visibilidad de la carretera también depende del diseño de los elementos que conforman su sección transversal. La berma y el sobreebancho contribuyen significativamente al aumento de visibilidad, principalmente en casos de taludes de corte.

Es de gran utilidad que los diseños geométricos de carreteras tengan auditorías de seguridad vial para que sean seguros, además de cumplir con las normas de diseño geométrico.

Referencias

- [1] B. E. Pineda Uribe, "Importancia de la maniobra de adelantamiento en carreteras de dos carriles", *Revista Politécnica*, vol. 7, n.º 13, pp. 22-29, 2011. doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec>
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS), "10 datos sobre la seguridad vial en el mundo". [En línea], 2017. Disponible: <https://www.who.int/features/factfiles/roadsafety/es/>. [Consultado: 9-julio-2019].
- [3] El Tiempo, "2017 quebró década en aumento de muertes por accidentes de tránsito". [En línea], 13 de diciembre de 2017. Disponible: <https://www.eltiempo.com/justicia/servicios/cifras-de-accidentes-de-transito-en-colombia-2017-161390>. [Consultado: 9-julio-2019].
- [4] E. N. Céspedes, E. L. Granados León, S. A. Useche Hernández, M. R. Hernández y J. Moreno Rodríguez, "Componentes descriptivos y explicativos de la accidentalidad vial en Colombia: incidencia del factor humano", *Revista Criminalidad*, vol. 56, n.º 1, pp. 157-187. [En línea, 2014. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-31082014000100009
- [5] J. J. Posada Henao, "Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones", tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2012.
- [6] J. M. Pardillo Mayora y R. Llamas Rubio, "Correlación de las características de las carreteras de dos carriles y la accidentalidad", *Carreteras*, n.º 125, pp. 7-16. [En línea], 2003. Disponible: <http://oa.upm.es/53529/>
- [7] V. G. Valencia Alaix, "Elaboración de procedimientos para facilitar el adelantamiento en carreteras convencionales aplicando simulación", tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, 2016.
- [8] Instituto Nacional de Vías (Invías), *Manual de diseño geométrico de carreteras*, Bogotá: Invías, 2008.
- [9] Instituto Nacional de Vías (Invías), *Manual de señalización vial. Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorrutas de Colombia*, Bogotá: Invías, 2015.



Universidad Cooperativa
de Colombia

