Enero – Agosto 2020, Vol. 27, N° 1–2, ISSN 1316–6832
Online ISSN: 2610-8240

FACULTAD DE INGENIERIA

Revista INGENIERÍA UC

Órgano de Divulgación
Científica y Tecnológica de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo

Disponible en:
Revista Ingeniería UC

http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista
www.redalyc.org/revista.oa?id=707

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200
Online ISSN: 2610-8240

Revista Ingeniería UC

Revista indizada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile);
IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing);
LATINDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters;
MIAR–Matriz de información para el análisis de revista;
RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico;
DOAJ–Directory of Open Access Journals.

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia–Venezuela

Editor - Jefe
Prof. Ángel D. Almarza M., Dr. Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Editores Honorarios
Prof. Edilberto Guevara, PhD. Vocal of the National Tribbunal of Water. National Water Authority, Perú. Instituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (1992-2003).✉

Profª. Lisbeth Manganiello, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2009-2018).✉

Prof. Francisco Arteaga, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2003-2009). ✉

Editores
Prof. Cristóbal Vega, PhD Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela ✉

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán, MSc. Instituto de Matemática y Calculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Editores Asociados
Profª. Evelyn Yamal. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Profª. Beatriz Herrera. Dra. Universidad Católica de Leuven, Bélgica. ✉

Profª. Lissette Jiménez. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Corrector de redacción y estilo
Profª. Vanessa Hurtado. MSc. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela. ✉

Junta Editorial
Dr. Adelmo Ortiz Conde
Universidad Simón Bolívar, Venezuela. ✉
Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela. ✉
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile. ✉
Dr. Herbertt J. Sira R.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. ✉
Dr. Enrique Barbieri
University of Houston, Estados Unidos. ✉
Dr. Ángel Rios Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España. ✉
Dr. Merlín Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela. ✉
Dr. José A. Díaz
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Roberto Callarotti
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. ✉
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200
Online ISSN: 2610-8240

Revista Ingeniería UC

Revista indizada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile);
IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing)
LATIDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.
MIAR–Matriz de información para el análisis de revista;
RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico;
DOAJ–Directory of Open Access Journals.

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia–Venezuela

Comité Técnico*

Dr. Luis G. Zárate López, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México
Dr. Enrique Cázares Rivera, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México
Dra. Laura Sáenz, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sede Latacunga, Ecuador
Ing. Johel Rodríguez, M.Sc., Universitat Politècnica de València, España
Ing. Pedro Vargas Ferrer,M.Sc., Universidad de Talca, Chile
Dr. Eliecer Colina, Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. Francisco García Sánchez, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Fernando Mora, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Carlos Hurtado, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. Giovanni De Mercato, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Gian Franco Passariello, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. William Castro, Instituto Venezonalo de Investigaciones Científicas, Venezuela
Dr. Oscar Crescente, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. Luis Mata Guevara, Universidad de Oriente, Venezuela
Dra. Maj Britt Mostue, Universidad de Oriente, Venezuela
Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela
Lic. Hernando Herrera Mata, M.Sc., Universidad de Oriente, Venezuela
Ing. Carlos Lameda, M.Sc., Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela
Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. William C. Henriquez Guzmán, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. Sergio Pérez Pacheco, Universidad Estatal de Bolívar, Ecuador
Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Lilly Marcano, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela
*Lista parcial

Frecuencia de publicación
Revista INGENIERÍA UC se publica un volumen anual en tres números: abril, agosto y diciembre

Información de Contacto

http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/

https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707
Correo–e: revistaing@uc.edu.ve
Correo–e: revistaing@gmail.com
Correo–e: adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)
Correo–e: jjjimenezgriman@gmail.com (J. Jiménez)

Redes sociales
Twitter: @RevistaIngUC
Instagram: revistainguc

Diseño y Diagramación: **Revista Ingeniería UC**, Dirección de Investigación – IMYCA (C. Vega) – CATS (J. Jiménez) en LaTeX, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

ISSN 1316–6832
Online ISSN: 2610-8240

Revista Ingeniería UC

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica

Facultad de Ingeniería

Universidad de Carabobo

Valencia – Venezuela

Contenido General, *(General content)*

Volumen 27 Número 1 **1**

Editorial volumen 27 número 1 **2**

José Luis Nazar†, Ángel Almarza-Morales, Lisbeth Manganiello

1 Posthumous tribute to the Professor *José Luis Nazar Álvarez*

Homenaje póstumo al Prof. José Luis Nazar Álvarez

Ángel Almarza-Morales **4**

2 An efficient hybrid recommender system framework using semantic technology for social networks

Framework de un sistema de recomendación híbrido eficiente utilizando tecnología semántica para redes sociales

Ali Pazahr, J. Javier Samper Zapater, Francisco García Sánchez **6**

3 Organo-clay material as coalescer oil filter in the treatment of oil production waters

Material organo-arcilloso como filtro coalescedor de crudo en el tratamiento de aguas de producción petrolera

Johnny Bullón, Jesús David Prato, Victoria Mousalli, Franklin Salazar, Leonardo Rennola **20**

4 Determination of factors that affect the design of cryptographic algorithms by a cybernetic meta-model, validated with Q-analysis

Determinación de los factores que afectan el diseño de algoritmos criptográficos por medio de un meta-modelo cibernético, validado con análisis-Q

Ali Norouzzadeh-GilMolk, Reza Ramazani-Khorshiddoust, Mohammad Aref **29**

5 Vibration assessment of transmission bearings of a mini Baja SAE prototype

Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE

Enrique Flores, Andrés Albornoz, Erwin López, Jorge Romero **41**

6 Use of synthetic series of average monthly flows for planning the operation of the Peruvian interconnected electrical system

Uso de series sintéticas de caudales medios mensuales en la planificación de la operación del sistema eléctrico interconectado nacional del Perú

Douglas Sarango-Julca, Abel Mejía-Marcacuzco, Edilberto Guevara-Pérez **54**

7 Improvement of Shared Awareness in Sensor Grid in Three Levels of CommonKADS Framework

Mejora del conocimiento compartido en malla de sensores en tres niveles del framework CommonKADS

Sedighe Bakhtiari, Mehdi N. Fesharaki, Ahmad Khadem-zadeh **69**

8 LaTeXin academic activities in the Mathematic Department of the Engineering Faculty

LaTeXen actividades académicas del Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería

Yanitza Román, Joan Ordoñez, Jesús J. Jiménez G. **78**

9 Creating a structure to calculate the organizational and technological process control effectiveness during redeployment

Creación de una estructura de cálculo para el proceso de control de efectividad tecnológica y organizacional durante reubicaciones

Azariy Abramovich Lapidus **84**

10 Planning and design of urban bikelanes. Metropolitan Area of Valencia (AMV), Venezuela

Planificación y Diseño de ciclovías urbanas. Experiencia Área Metropolitana de Valencia (AMV), Venezuela

Isandra Villegas, Betty Farías **91**

11 Evaluation of the influence of annealing time on the mechanical, electrical and microstructural properties of aluminum alloy AA-8176

Evaluación de la influencia del tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y microestructurales de la aleación de aluminio AA-8176

Leonel Salazar, Kelvyn Matute, Luís Sidorovas **102**

Volumen 27 Número 2 **115**

Editorial volumen 27 número 2 **116**

Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales

12 *Review*: Chitosan, a versatil biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications

*Estado del arte:*Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones

Alied Romero Serrano, Juan Pereira **118**

13 Effect of the arrangement of drip irrigation laterals and partial soil drying on potato yield

Efecto de la disposición de laterales de riego por goteo y secado parcial del suelo en el rendimiento de papa

Miguel Sánchez-Delgado, Jesús Mejía-Marcacuzco, Edilberto Guevara-Pérez, Piero Natividad-Toribio, Luis Razuri-Ramírez **136**

14 Phenol degradation and HPLC identification of products generated using red mud as a catalyst in solar advanced oxidation processes

Degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar

Guillermo Centeno-Bordones, Leidy Pernía, Ygmar Jiménez†, José V. García **150**

15 Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process

Tratamiento de aguas residuales de camales mediante tecnologías avanzadas de oxidación: proceso fenton

Carlos Medina-Valderrama, Wilmer Uriarte-Tirado, Ernesto Cardenas-Vásquez, Salvador Orrego-Zapo **165**

16 Using Agent Base Model for managing the critical situation of groundwater resources and aquifer balancing (Case study: Iran-Qazvin Plain Aquifer)

Uso del modelo basado en agentes para gestionar la situación crítica de los recursos de aguas subterráneas y el equilibrio de los acuíferos
(Estudio de caso: Acuífero de la llanura Irán-Qazvin)

Hamid Rahmani, Ali saremi, Shahab Araghinejad, Hossain Babazadeh **175**

17 Performance evaluation of hydrological models GR4J, HBV and SOCONT for the forecast of average daily flows in the Ramis river basin, Peru

Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú

Efrain Lujano, Jesús David Sosa, Rene Lujano, Apolinario Lujano **189**

18 Oily wastewaters produced in carwashes in the city of Cumaná, Venezuela

Aguas residuales aceitosas generadas en autolavados de la ciudad de Cumaná, Venezuela

Carlos Ortiz **200**

19 Influence of the number of passes on residual efforts when welding an ASTM A131 steel through the GMAW process

Influencia del número de pasadas sobre los esfuerzos residuales al soldar un acero ASTM A131 mediante el proceso GMAW

Albenis Díaz, Sergio Guerra, Maritza Villalta, Carmelo Torres **211**

20 Design an algorithm for analyzing the stability of information exchange between UAVS in the high-order agent formation

Diseño de un algoritmo para analizar la estabilidad del intercambio de información entre UAVS en la formación de agentes de alto nivel

O. R. Kuzichkin, G. S. Vasilyev, D. I. Surzhik **224**

21 *Tech Note:* Study of LED filament lamp parameters (Trademark general lighting systems)

Nota técnica: Estudio de los parámetros de lámparas de filamento LED (Sistemas de iluminación general de marcas comerciales)

O. E. Zheleznikova, Yu. A. Zhuravleva, S. A. Mikaeva **233**

22 *Tech note*: Analogy between the ventricular volume and the charge and discharge of a condenser

Nota técnica: Analogía entre el volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador

Aleida Cantor-Rudas **237**

Fe de errata **245**

Índice de materias **246**

Subjects index **248**

Índice de autores (*Author index*) **250**

Apéndices 1

A. Línea editorial **2**

B. Editorial line **3**

C. Políticas de ética y publicación **4**

D. Ethics and Publication Policies **8**

E. Normas para la presentación de artículos **11**

F. Authors Information **14**

G. Carta de compromiso **16**

H. Compromise letter **17**

I. Índices de Revista Ingeniería UC **18**


FACULTAD
DE
INGENIERIA

Volumen 27 Número 1

Editorial

Presentamos el volumen 27, N° 1 de Revista Ingeniería UC en medio de una situación particularmente diferente frente a la realidad que ha representado la pandemia por la covid-19, enfermedad generada por el virus SARS-CoV-2. En este sentido, queremos resaltar y agradecer tanto los esfuerzos del equipo editorial y revisores, como el de todos los autores que han trabajado junto a nosotros, ajustándose a las diversas medidas adoptadas en todas las latitudes para contener y superar los brotes del virus, y que vale mencionar, han implicado cambios contundentes en nuestros modos de trabajar y relacionarnos, alcanzando, más allá de ello, la presentación de los artículos que hoy día conforman este número, que dedicamos con todo el afecto y respeto al Prof. *José Luis Nazar Álvarez*, quien nos acompañó como Decano de la Facultad de Ingeniería desde el año 2009 hasta el día de su sensible fallecimiento el 13 de abril de 2020, y a quien ofrecemos un sentido homenaje.

Sabemos que en esta vida nos encontramos de paso, pero debemos honrar a aquellos que han hecho el bien, han construido y dejado un legado. Tal es el caso del *Profesor Nazar*, quien apenas recibió el decanato de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, se puso manos a la obra para hacer de la Revista Ingeniería UC lo que hoy en día es, nuestro principal medio de divulgación científica, no solo de la Facultad, de la Universidad de Carabobo, sino también de nuestro país, en lo que refiere a su línea Editorial, llenando de orgullo a cada investigador y convirtiéndose en patrimonio de todos los profesores de nuestra Ilustre Facultad.

El *Profesor Nazar* será recordado por siempre como el "Decano de la Apertura", nuestra principal tarea no era solamente la puntualidad en la entrega de cada ejemplar, sino apoyar a todos los profesores noveles y a nuestros estudiantes con trabajos especiales de grado de calidad excepcional, enseñarlos a escribir un artículo científico se convirtió en prioridad. Aunado a esta labor, optamos por portadas más sencillas muy propias de los Journal Internacionales, adoptamos el editor profesional LaTeX y no podía faltar una cuidadosa revisión de la citas bibliográficas de cada manuscrito, todo este trabajo pronto dio sus frutos, la indexación en WoS entre otros índices de alta visibilidad mundial y la demanda de investigadores internacionales para publicar en la Revista Ingeniería UC. Finalmente, ideamos un sistema de autogestión que permite a la revista mantener los procesos de edición y montaje.

Iniciamos el número con el trabajo presentado por Pazahar, Samper-Zapater y García-Sánchez, donde se propone un framework de un sistema de recomendación basado en los intereses de los usuarios y centrado en lógica semántica, el cual obtuvo una precisión de 0,7498 mediante la implementación en una aplicación web.

Seguidamente, Bullón y colaboradores, muestran los hallazgos relativos a la construcción de un filtro coalesceador de crudo para agua de producción petrolera, empleando material órgano-arcilloso originario de los Andes venezolanos, demostrando que el mismo es adecuado para la coalescencia de gotas de petróleo.

Por su parte, Nourouzzadeh-GilMolk y su equipo de investigadores presentan un metamodelo para la determinación de los factores que afectan el diseño de algoritmos criptográficos validado con análisis-Q., indicando que el grupo de componentes más significativo para desarrollar un sistema de cifrado consta de: recursos humanos, I-D, normas y reglamentos, TI y estándares.

Luego, Flores y su grupo, analizaron los posibles defectos existentes asociados a las vibraciones en los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo Baja SAE UC 2004, mediante una evaluación no invasiva, encontrando que todos los rodamientos del sistema de transmisión presentaron posibilidad de

falla para las dos velocidades de giro del eje de transmisión definidas en el estudio, siendo la posibilidad de falla más recurrente asociada a los defectos en la pista externa.

Así mismo, Sarango, Mejía y Guevara proponen el uso de series sintéticas de caudales medios mensuales en la planificación de la operación del sistema eléctrico interconectado nacional del Perú, alcanzando el estudio el análisis histórico de 23 cuencas hidrográficas generando 300 series sintéticas que comprenden el período entre 1965 y 2016.

Por otro lado, Bakhtiari, Fesharaki y Khadem-zadeh nos presentan una mejora del conocimiento compartido en malla de sensores en tres niveles del framework CommonKADS, permitiendo la gestión de información y datos en tiempo real, así como también de computación distribuida, una red de sensores a gran escala para la toma de decisiones precisas.

Román, Ordoñez y Jiménez, hacen la propuesta estratégica del uso del procesador de palabras LaTeX en actividades académicas tanto de estudiantes como de profesores en el Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería para brindar una competencia que coadyuve a mejorar el rendimiento académico. Así mismo, Lapidus evalúa en su artículo la relevancia y oportunidad de considerar los problemas de organización de la producción durante la reurbanización de los territorios industriales del entorno urbano, analizando los requisitos previos básicos presentes en el fenómeno de reurbanización, y también se identifican los parámetros que tienen un impacto importante en la toma de decisiones sobre los métodos para cambiar el propósito funcional de las áreas urbanas.

Villegas y Farías, abordan la problemática de movilidad urbana en las ciudades venezolanas y de manera más específica en el área metropolitana de Valencia, por medio de la planificación y diseño de ciclovías que incluye la delimitación del área de estudio, el levantamiento de campo, el estudio de demanda, la selección de las rutas con mayor grado de factibilidad y el diseño geométrico de la red troncal de ciclovías seleccionadas.

Finalmente, Sidorovas y sus colaboradores evalúan la influencia del tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y microestructurales de la aleación de aluminio AA-8176, concluyendo que a mayor tiempo del recocido, el material se hizo hasta un 30 por ciento más dúctil y se presentó un crecimiento del tamaño de grano de 30 μm hasta 200 μm para el recocido de 12 horas.

Cerramos este editorial, invitando a publicar en nuestra Revista INGENIERÍA UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería y ciencias afines.

Profesor *José Luis Nazar*†
Decano de la Facultad de Ingeniería
Marzo 2009–Abril 2020

Profesor *Ángel Daniel Almarza*, Dr.
Editor – Jefe

Querido *Profesor Nazar*, que vuele muy alto y la gracia infinita de Dios lo acompañe por siempre.

Profesora Lisbeth Manganiello, PhD.
Editora Honoraria
Marzo 2009–Septiembre 2018

Posthumous tribute to the Professor *José Luis Nazar Álvarez*

Ángel Almarza-Morales *

Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

Homenaje póstumo al Prof. *José Luis Nazar Álvarez*

Con profunda gratitud hacemos entrega de este tributo a la memoria del Prof. *José Luis Nazar Álvarez* (Figura 1) quien, por más de cuarenta años al servicio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, fue ejemplo y referencia por su experiencia, templanza, gran sentido de pertenencia y responsabilidad en el quehacer universitario visto desde sus diversas aristas.



Figura 1: Prof. *José Luis Nazar Álvarez*

En 1971, inicia sus estudios en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, de donde egresa en 1976 titulándose como Ingeniero Industrial. En ese mismo año, comienzan sus labores como profesor adscrito al Departamento de Ingeniería Estructural de la Escuela de Ingeniería Civil, desarrollando su perfeccionamiento profesional en los tópicos de Control de Calidad e Inspección de Obras Civiles, Gerencia y Desarrollo de Proyectos, Sistemas Constructivos en fibrocemento, Análisis de estructuras sismo-resistentes, entre otros. Recibiéndose luego como Magister en ingeniería Industrial en el año 2002.

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)

En el plano profesional desarrolló diversas obras como el diseño y desarrollo del sifón de acero tubería 64" acueducto Regional del Centro INOS, y la coordinación general de proyectos como la construcción del Edificio de infraestructura y el Edificio Administrativo del Complejo PEQUIVEN, así como la construcción de talleres de las minas de Riecito.

Desde el contexto universitario, el Profesor *José Luis Nazar* se desempeñó como Director de la escuela de Ingeniería Civil (1988–1989), Director asistente al Decano (1989–1991), Director General de Obras (1998), Director de Planta Física (1999–2000), Consejero Universitario (1997–1999), Director de la Estación de Promoción de Desarrollo Tecnológico (2005–2006), Consejero de Facultad (2007–2009) y Decano de la Facultad de Ingeniería a partir del año 2009 hasta su partida física aun en cumplimiento de sus funciones, manteniéndose como docente activo por más de cuarenta años, en los que fue patente su honestidad, transparencia, lealtad y compromiso.

La situación de deterioro generalizado en el sector universitario, incluyendo partidas presupuestarias estrechas en una Facultad de Ingeniería con necesidades diversas en términos de servicios e infraestructura, no le impidieron enfrentar los problemas y avanzar en sus soluciones, siendo siempre partícipe y líder en todas aquellas acciones que estuvieron enfocadas en asegurar la calidad de las actividades académicas. En la Figura 2 se ejemplifica su gestión y participación en una de las múltiples contingencias acontecidas, en esa oportunidad se concentraba en la búsqueda de alternativas para solventar la afectación del 50 % de las instalaciones de la Facultad a consecuencia del

hurto de los cables principales del sistema eléctrico en septiembre de 2017.



Figura 2: Supervisión de las labores relativas a la emergencia eléctrica de la facultad [1]

Es para nosotros fundamental, destacar el invaluable apoyo que en todo momento ofreció al fomento de las actividades de Investigación y Divulgación de la ciencia, poniendo siempre como prioridad el desarrollo y evolución de la Revista Ingeniería UC como principal plataforma para resaltar los valiosos productos de investigación generados en el seno de nuestra facultad, incentivando con esto también la prosecución de las carreras académicas de los docentes, actividades conjuntas que se mantenían de manera simultánea con el progreso de la Dirección de Postgrado alcanzando la constitución y establecimiento de nuestro programa de Doctorado en Ingeniería, permitiendo así el desarrollo académico de nuestros docentes.

No menos importante fue su interés y empeño por impulsar una reforma curricular por competencias en la Facultad de Ingeniería, proceso que inició como piloto en la escuela de industrial concretado en marzo del año 2017 y que se vino materializando luego en las demás escuelas, todo lo cual estaba enmarcado en el anhelo de mantener a nuestra facultad a la vanguardia junto a sus pares de iberoamerica.

Más relevante aún es resaltar la valentía con que sobrellevó sus padecimientos de salud, manteniendo un espíritu de lucha y determinación incomparables durante varios años, acompasando magistralmente las indicaciones y procedimientos médicos a las cuales fue sometido con sus compromisos y responsabilidades institucionales, que nunca dejó a un lado (Figura 3).



Figura 3: Revisión de informes para cumplir con responsabilidades institucionales

Su partida física ha resultado dolorosa, sin embargo, deja un legado para nosotros y las generaciones futuras, basado en los firmes principios del respeto, la vocación de servicio, el entendimiento e incluso la autocrítica para dar alcance a metas y objetivos comunes, destacando siempre su capacidad de ser directo y firme en sus convicciones, sin cerrar jamás el espacio para la amistad genuina y sincera.

Sirva este como un pequeño homenaje al Prof. *José Luis Nazar Álvarez*, quien en vida fue un académico y universitario íntegro, ingeniero de gran valía profesional, buen padre de familia, ejemplo de valentía, luchador incansable, gran ser humano y mejor amigo.

1. Referencias

[1] Diario El Carabobeño, Foto de Kevin Arteaga. (2017, Sep.) UC reinició las actividades con la Facultad de Ingeniería a media máquina. Valencia.

An efficient hybrid recommender system framework using semantic technology for social networks

Ali Pazahr *,[a], José Javier Samper-Zapater [b], Francisco García-Sánchez [c]

[a] *Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz branch. Ahvaz, Iran.*
[b] *University research institute on Robotics and Information and Communications Technologies (IRTIC), University of Valencia. Valencia, Spain.*
[c] *Department of Informatics and Systems, University of Murcia. Murcia, Spain.*

Abstract.- The first group of companies that have a business on online social networks try to design an efficient plan for making more money on this platform. Advertising can be a solution for introducing and promoting the services or products for the clients and it can be led to more sells. There are a second group of companies intended to use advertisements on social networks, many of these annoy the users since they are not fascinating or matched for the clients. The primary target of the current study is to design and present a model of advertising recommender systems on social networks using innovative techniques. Although there are numerous applications and research works about recommender frameworks, in the proposed model, it is valuable to plan a recommender system which focus more precisely on the user's interests. The framework uses a semantic logic to increase the accuracy of the recommendations along with using a combination of four recommender methods, the particular estimations for each method and the integration of recommendations generated by each method using a rank-based approach which totally can differentiate the proposed recommender framework from the previous similar methods. The accuracy of suggested framework is 0,7498 that was revealed by implementing a web application. The comparison of some similar models with the current work based on various features and aspects shows a significant excellence of this study.

Keywords: recommender systems; social networks; user preferences; semantic technology.

Framework de un sistema de recomendación híbrido eficiente utilizando tecnología semántica para redes sociales

Resumen.- El primer grupo de empresas que tienen un negocio en línea en redes sociales intenta diseñar un plan eficiente para incrementar sus ganancias en esta plataforma. La publicidad puede ser una solución para introducir y promocionar servicios o productos para los clientes, lo cual puede conducir a más ventas. Existe un segundo grupo de empresas destinadas a utilizar anuncios en las redes sociales, muchos de los cuales molestan a los usuarios ya que no son fascinantes o coinciden con los clientes. El objetivo principal del actual estudio es diseñar y presentar un modelo de sistemas de recomendación publicitaria en las redes sociales utilizando técnicas innovadoras. Aunque existen numerosas aplicaciones y trabajos de investigación sobre frameworks de recomendación, en el modelo propuesto, es valioso planificar un sistema de recomendación que se centre en los intereses del usuario. El *framework* utiliza una lógica semántica para aumentar la precisión de las recomendaciones junto con el uso de una combinación de cuatro métodos, las estimaciones particulares para cada método y la integración de las recomendaciones generadas mediante un enfoque basado en posiciones que puede diferenciar totalmente el *framework* de recomendación propuesto con respecto a métodos similares anteriores. La precisión del *framework* sugerido tiene un valor de 0,7498 que se obtuvo mediante la implementación de una aplicación web. La comparación de algunos modelos similares con el trabajo actual basado en diversas características y aspectos, muestra una excelencia significativa en este estudio.

Palabras clave: sistemas de recomendación; redes sociales; preferencias de usuario; tecnología semántica.

Received: January 02, 2020.
Accepted: February 18, 2020.

1. Introduction

The platform of social network as a place of communicating users, is a great opportunity to get billions of dollars in venture and procurement using advertisements [1]. The information on social

* Correspondence author:
*e-mail:*pazahr@iauahvaz.ac.ir (A. Pazahr)

websites is generated by users and to determine their interests, there are several limits and obstacles for acquiring user's information and preferences [2]. The semantic technology can operate as a suitable facility to determine the relationship among products and clients on social networks. This technology has been considered as a utility for developing the web, whereas it expresses the meaning of the contents on the web using different frameworks that resolve the ambiguity of unclear concepts and as a result it upgrades the level of our life [3][4]. One of the most popular elements of semantic web that can be also utilized for recommender systems is ontology [5][6]. The ontologies have simple structures and they can easily present the concept of various information [7]. Besides, the other technologies that can be affiliated are OWL [8] and RDF [9], totally they can semantically describe many kinds of concepts and entities. Using these assets it is possible to define smart web applications such as semantic search engines [10] that represent considerably more acceptable and usable outcomes rather than traditional search engines which is led to more client's satisfaction. As the present research contribution, the current study brings the advantages of four standard techniques altogether, along with using the semantic technology for improving the recommendations, the generation of recommendations using specific estimations, aggregating the same recommendations by different standard methods into one recommendation by the sum of their rates, utilization of both social network user rates and recommender framework user rates, preparing a new dataset required for evaluation of the framework by collecting data from a social network, and comparing some similar related works with several features and factors demonstrating the superiorities of the proposed model.

2. Related works

In spite of the numerous promising provided aspects, the semantic web has not been broadly utilized in software platforms [11]. The reason is that the process of ontology establishment, annotation and its maintenance is relatively difficult. In addition, it is troublesome to not only learn the required skills [12] but also use of necessary libraries for which it is needed to get expertise [13]. The combination of social web and semantic technology [14][15] presents social semantic web or web 3.0 [16]. Proportionate to this definition, a web application can display the benefits of semantic utilities and social web altogether [17][18]. Moreover, the clustering approaches can increase the accuracy of decision making systems [19] such as recommender systems. The methodology explained in [20] utilizes the collaborative tagging aggregated by numerous number of users to enhance the quality of social network recommendation. The solution comprised two phases, in the first step, the tag-item weight pattern was estimated and in the second phase, the user-tag preference pattern was computed. Then the two patterns were considered to seek the appropriate items fit to the users' interests and recommend the items including the maximum rate. Furthermore, the tag rate can be estimated and suggest the tags with the maximum weight to the user considering their interests. By applying the social web properties, it is possible to see the capabilities of recommender systems that are implemented on social networks and observe the wonderful results in attracting the audiences and clients [21]. As mentioned in [22] a new combined method is demonstrated that increases sparse tag shows without presenting content in direct. The provided method coordinates pseudo-tags gained from information into the tag presentation of a track, and a unique weighting plan constrains the quantity of pseudo-tags that are permitted to contribute. Examinations represent that this technique enables tags to stay predominant when they give a solid presentation, and pseudo-tags to assume control over when labels are sparse. The context-aware recommender model in [23] improves the recommendation procedure with context to suit the recommendation outcomes to end users. By utilizing the social tagging, the model estimated the latent interests of users on contexts from other similar contexts, also latent parts of contexts for items from other similar

items. By discovering the similarities between the user's contexts, the contexts and items, it is possible to specify the marvelous items using a particular context. Consequently, the method maps the context on the items regarding on that specific user, for recommending the closest item suitable to the users' preferences. The research [24] combines clustering and ranking aggregation methods to find a solution for sparsity, scalability, and cold-start problems. The suggested clustering method utilizes K-means algorithm. The framework is performed based on the dataset of MovieLens, which includes the genre and demographic information. Furthermore, the ranking aggregation method facilitates Borda and Copeland approaches to be evaluated. In [25] it is argued that items are endured from the sparsity problem more seriously than users, because items are normally seen with fewer attributes to help a feature-based or content-based method. To overcome this difficulty, the complicated relation of each item×user×query triple from item's point of view is sufficiently prospected. Using integration of item-based collaborative information for this task, another factorized method was presented that could primarily measure the ranks of the items with sparse data for the provided query-user pair. Moreover, a bayesian personalized ranking (BPR) method was suggested to be utilized to enhance latent collaborative retrieval difficulty from pairwise learning point of view. The accuracy of recommendations can be enriched using a semantic approach and a hybrid recommender technique [26][27]. The solution proves that such composed system can provide more relatively accurate recommendations in comparison with three other models as SPAC, Friendbook and another system. The current research is an extended version of [27], but in this work, the proposed framework is compared with the other similar investigations as Pseudo-tag algorithm [22], CAMRST [23], RABCRS [24], and TIIREC [25] models along with more discussion. An appropriate search through Google Scholar database for the most recent related works based on some excellence of a recommender system [28] were established including item's features, users' feedback, similarity metrics, utilized recommender techniques, considered evaluation metrics, and cold-start overcome and the mentioned works in Table 3 were found. The current proposed method was evaluated using Precision & Recall, MAE, RMSE and discussed to find the improvements and excellences of the proposed model in comparison to the mentioned similar works. Semantic recommender methods are organized through the usage of semantic learning in the procedures of recommendation production along with a particular purpose to increase recommendation's precision [29]. The concepts earned from improving the representation of user profiles is utilized by majority of these methods [30]. Although in the current work there is an attention to use of a particular aspect of semantic technology, the other similar works have usually misused it for enriching the recommendations [31]. The prominent part of similar works has used semantic similarity to increase the accuracy of content-based models [32], however the other recommender systems exist which use semantic technology and try to concentrate on user profile in standard recommender techniques [33].

3. Literature review

The recommender systems are the software applications that check a user profile and try to generate some suggestions for the user based on user's interests and activities. It is possible to update the profiles of users by controlling their activities or direct rating of products. Although these systems anticipate the recommendations with the most possibility of accuracy, but in some cases may not be successful in providing the desirable results. Recently the usage of recommender systems has been rising as an advantageous part of the websites [34]. Furthermore, many of e-commerce websites have been equipped with the recommender systems [35]. The calculations in the proposed model of recommender system are as follows [36]: Considering the set of users u as U where $u \in U$ and the set of items i as I where $i \in I$, a matrix including the given rates by users to the items is named as $s(u,i)$ as a $U \times I$

space. In this matrix, some cells are initiated that means a user has rated the item and the rest of cells are remained blank for which the recommender system will anticipate appropriate values. If a considerable number of the cells are initially blank, the matrix is sparse and the recommender system will suffer from this issue as cold start problem [37]. As indicated in [38], the U_P is an array including all user profiles. The functionality of a recommender system is distinguished using a map of users of U to $P(I)$ as the recommended items which can be considered $P(U_P)$ as a set of user profiles. Accordingly, *REC* as the recommendation set can be defined as *REC*: $P(U_P) \times U \rightarrow P(I)$. More clearly the rating matrix is utilized as matrix $[s(u_k, i_j)]_{m\times n}$ that can be illustrated in Figure 1. The values in this matrix are in the range of 0 to 5. Moreover, the rating matrix can be normalized to another matrix that is shown in Figure 2.

$$\begin{array}{c} \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{m-1} \\ u_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} i_1 & i_2 & \dots & \dots & i_{n-1} & i_n \end{array} \\ \begin{pmatrix} 1 & & & 4 & & \\ & & 2 & 3 & & \\ & 3 & & & & 2 \\ 0 & & & 5 & & \\ 0 & & & 5 & & 1 \\ & & & 2 & 0 & \end{pmatrix} \end{array}$$

Figure 1: The main rating matrix

$$\begin{array}{c} \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{m-1} \\ u_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} i_1 & i_2 & \dots & \dots & i_{n-1} & i_n \end{array} \\ \begin{pmatrix} 1 & & & 1 & & \\ & & 1 & 1 & & \\ & 1 & & & & 1 \\ 1 & & & 1 & & \\ 1 & & & 1 & & 1 \\ & & & 1 & 1 & \end{pmatrix} \end{array}$$

Figure 2: The rating matrix after normalization

In other words, *REC* as the recommendations can be stated for the user u_k considering up as the user profile in equation (1).

$$REC(u_p, u_k) = \{i \mid s(u_k, i) = \arg\max i \in I\} \quad (1)$$

The most valuable item is assigned as arg max. Therefore, the main part of a recommender system is to detect the unspecified cells of the rating matrix that relate to the items without any opinion from the corresponding user and then, calculate appropriate values for the cells according to the recommender system strategy. Finally, the highest values in form of ranks are recommended to the user.

4. Methodology

In this section an overview of the proposed framework is depicted containing different elements. Consequently, each of the elements are demonstrated including their main characteristics and their task. In this study the effort has been that a complete and accurate system is designed and implemented as much as possible. To reach this aim we used artificial intelligence techniques in the recommender system algorithm. The proposed method uses the advantages and highlights of four standard techniques while the majority of similar research works only utilize one or two techniques. During the user activities, it is possible to use the generated recommendations as the feedbacks for the next rounds of recommendation generation process. Figure 3 displays the proposed model of recommender system along with its elements.

For calculating of the matrix of rates, five degrees for user's interests are considered which can be assigned to the products. These values are determined during their activities on the specific web pages when the users express their opinions about the products. As a variable, i_{rank} (rank of interest) is pointed to the user interest rate. In this research the values of 1 to 5 are assigned to the different levels of tendency related to each product. If the user looks for a product, the value of i_{rank} is set to value 5. In the more interesting condition, i_{rank} is set to 4, if the specific product is browsed or shown along with its details for the user. It can be determined that the user attention to that product in case of browsing or showing has more rank rather than searching. Totally, the

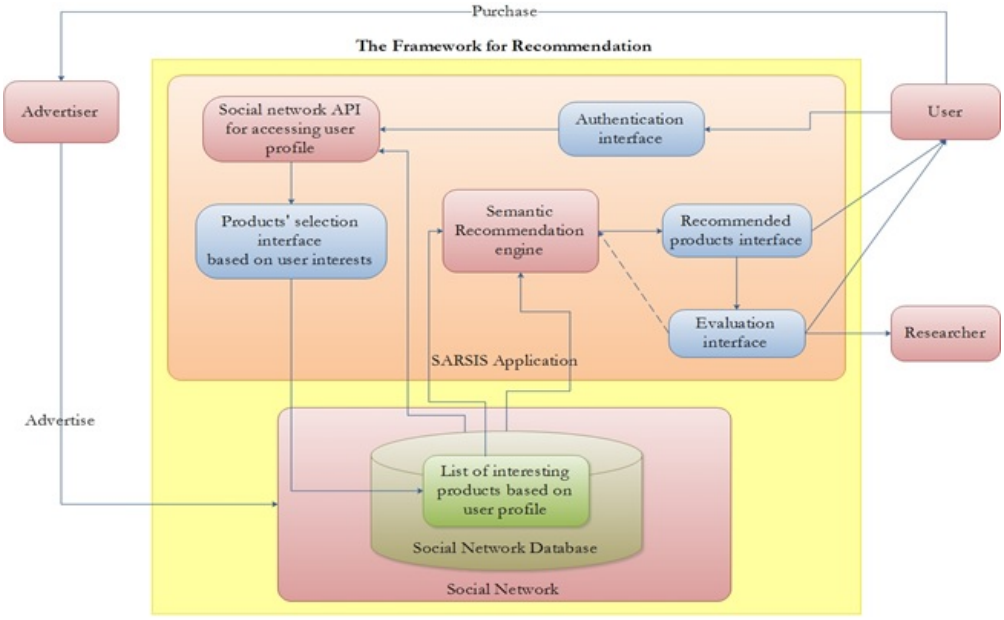


Figure 3: The suggested framework of recommender system

more rank of i_{rank} is, the higher user has interest to the product. Subsequently, if the user has a direct intention to the product by starring it between 1 to 3, the logic of the recommender system sets i_{rank} respectively from 3 to 1. There is another important variable in the current framework as t_{rank} (rank of product) which points to the rank of an advertisement on social network, created by a producer. The t_{rank} value is gathered from the activity of other users on social networks generally and earned previously. It indicates the popularity value of the product among social networks' users. In this study, two equations, one for demographic recommender technique (equation (2)) and another for the context-aware recommender technique (equation (3)) are used to calculate a final rate of it_{rate} separately based on the user's available data on social network for detecting the potential recommendations in the next step [27].

$$it_{rate} = \frac{arrSimilarUsersDemo[i,1]}{(5 \cdot i_{rank} \cdot t_{rank})} \quad (2)$$

$$it_{rate} = \frac{arrSimilarUsersCtx[i,1]}{(6 \cdot i_{rank} \cdot t_{rank})} \quad (3)$$

The value of the variable it_{rate} shows the amount of user's interest about a product. This variable is based on some parameters including i_{rank}, t_{rank}, user's similarity, and a fixed ratio which in this study is set to 5 for demographic and 6 for context-aware recommender parts. For the content-based filtering part of the suggested framework, the details of the products along with the label *cb* which indicates the type of recommender element, current user's username and it_{rate} estimated by equation (4) were added to the table *Recs*:

$$it_{rate} = \frac{1}{(6 \cdot t_{rank})} \quad (4)$$

The final part of the recommender system, collaborative filtering, uses the kNN algorithm to discover the users with the most similarity to the current user. The matrix $w_{a,u}$ was calculated based on the equation (5) [39] including all weights or the values of user's closeness together.

$$w_{a,u} = \frac{\sum_{i \in I} \left(r_{a,i} - \bar{r}_a\right)\left(r_{u,i} - \bar{r}_u\right)}{\sqrt{\sum_{i \in I} \left(r_{a,i} - \bar{r}_a\right)^2 \sum_{i \in I} \left(r_{u,i} - \bar{r}_u\right)^2}} \quad (5)$$

In equation (5) I refers to the set of items (products) which can be rated by the users, the assigned rate to the product i by the user u is $r_{u,I}$,

and the mean rate which is given by user u is $\bar{r}_a$. Using equation (6) [39] the unrated cells of the matrix w were estimated:

$$p_{a,i} = \bar{r}_a + \frac{\sum_{u \in K} \left(r_{u,i} - \bar{r}_u\right) \cdot w_{a,u}}{\sum_{u \in K} w_{a,u}} \quad (6)$$

In equation (6), the prediction value of the current user for the product i is considered as $p_{a,i}$, the similarity value between the user a and the user u is assigned as $w_{a,u}$, and the set of most similar users as a kind of neighborhood is considered as K. If the generated recommendations by the collaborative filtering part have been formerly saved to the table *Recs*, their relevant values are replaced by the new recommended items to avoid redundancy. The highest values estimated by the recent equation were appended to the table *Recs* for each user, along with the other necessary details including product *id*, the mark *cf* showing the recommendation method, username, and it_{rate} value which was calculated using the equation (7):

$$It_{rate} = \frac{rates[\text{useridindex, productidindex}]}{10} \quad (7)$$

Consequently, among all out arranged recommendations through four strategies from the table *Recs*, top ten items with most elevated it_{rate} values, is appeared to the current user. One fascinating curiosity with regards to this recommender system is that a gathering of determined prescribed items for the current user which even could be found more than once yet assessed by various methods with various it_{rate} values, are collected dependent on it_{rate} values. For this reason, a SQL task of "Group by" *productid* and *userid* is accomplished alongside considering an all out it_{rate} of suggestions utilizing four methods as $Total_it_{rate}$. Therefore, the records obtained of the ongoing dataset conceivably demonstrate the expected interest rate of the user about the items. At last, these records ought to be arranged by $Total_it_{rate}$ so as to locate the best suggestions. Furthermore, the technique of generating the recommendations is based on the ranks. Therefore, for each item, its it_{rate} is estimated by equation (8):

$$Total_it_{rate} = \sum_{i=1}^{n} \left(it_{rate}\left(i\right)\right) \quad (8)$$

In equation (8), the maximum value as n is 4 referring to the four standard techniques and i points to the number of each recommendation method. The implementation steps of the proposed model have been depicted in Figure 4 where it shows how the model works.

The proposed model mentioned has been depicted generally and it is possible to use the framework for any social network containing even other types of media. However, to run the model on a real platform and present the operation of the model, the social network of `last.fm` as a suitable case study was chosen to perceive the functionality of the recommender system in practice. The social network `last.fm` was established in the UK in 2002 working on music category [40]. In this case study, several methods are utilized to collect data from the social network such as `tag.gettopartists`, `artist.getinfo`, `artist.gettoptracks`, `tag.getsimilar` and `track.gettoptags`. For running the model, a web application named SARSIS was developed in Microsoft Visual Studio .NET using ASP.NET technology. The frontend of this application was designed based on two languages consist of Persian and English. Figure 5 shows the navigation of web pages in the application.

For testing the framework and monitoring how it really works, it was necessary to use a dataset as the backend of the web application. The software application Microsoft SQL Server was used to maintain and manage the database. The tables in the database include user interests, artists, users, user rates, recommendations, and tracks. To start the web application and initialize the tables tracks and artists, a separate code was developed to crawl music data from `last.fm` as the case study of social network. The collected data was prepared including 13.7685 music tracks and 2.125 artist profiles during three weeks. In this code a number of RESTful queries have been executed on the

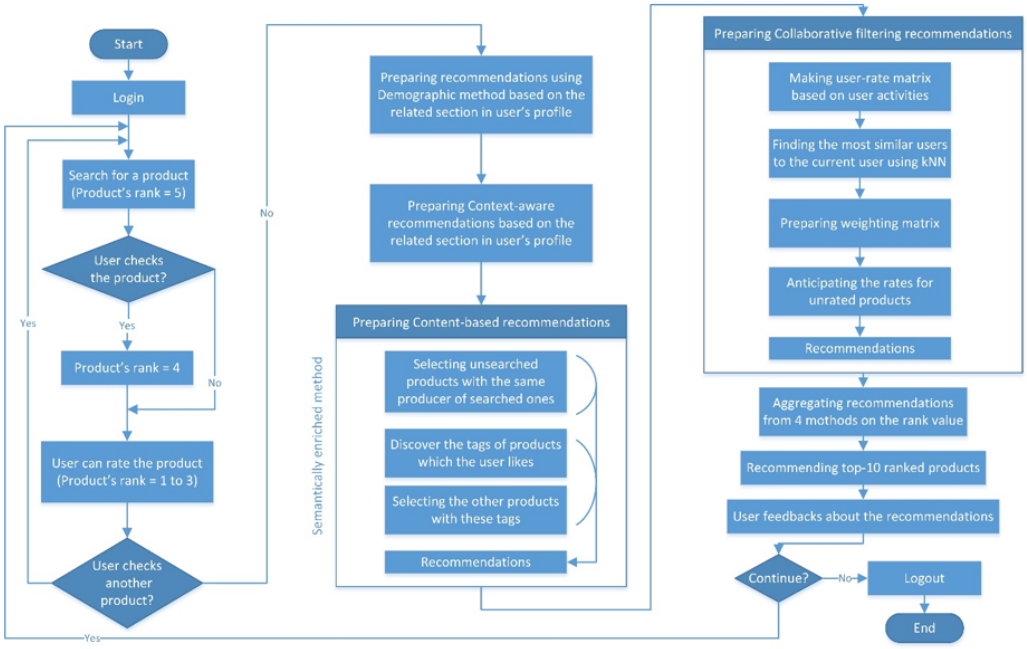


Figure 4: Implementation and work model

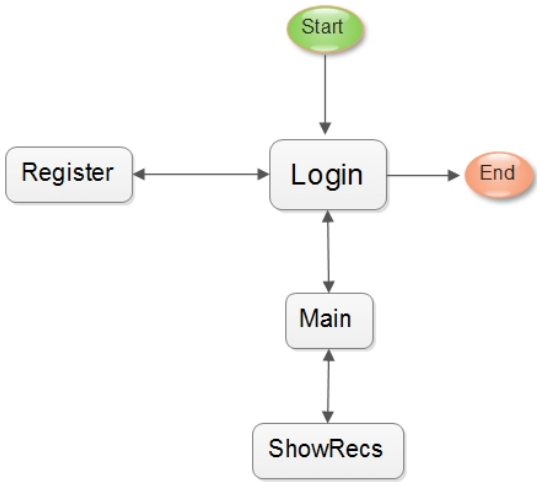


Figure 5: The navigation of web pages in SARSIS

`last.fm`, the streams of responses as the results were obtained in XML format, parsed to enumerate the artist and track data and finally saved into the database as the tables artists and tracks so that they can be utilized for the recommender system.

5. Evaluation

The generated recommendations using SARSIS were assessed using some evaluation metrics and it proved that SARSIS has had an enhanced combination in comparison with the previous similar works. The metric of MAE as the error of the framework could be used to discover the total amount of distance between the recommendations and what the users really preferred. Equation (9) shows how MAE is calculated:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |p_i - q_i|}{N} \tag{9}$$

A high value of accuracy is recognized through the lower values of MAE. The precision, recall and F1 metrics can be estimated using equation (10), equation (11) and equation (12) respectively.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{10}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{11}$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \tag{12}$$

The variable TP refers to the previewed tracks that were liked by users (the number of likes in Table 1), the variable FP refers to the recommended tracks that were not liked by users (the number of

Unlikes for each user in Table 1), and the variable *FN* refers to the tracks that were not shown to the user via searching, listening or rating and they are not recommended, while they can be potentially interesting for the users as the recommendations.

6. Results and discussions

The ideal results in recommender systems comprise the recommendations with the lowest error and highest accuracy as much as possible. Furthermore, it is important to remember that the design of such frameworks encounters particular limitations and problems. In the proposed model not only the benefits of four standard techniques but also a semantic technology has been totally used. The number of 73 users tested SARSIS and based on the gathered information from running the case study, remarkable results were seen related to the framework. The range of user ages in running the case study is classified to 6 groups as shown in Figure 6.

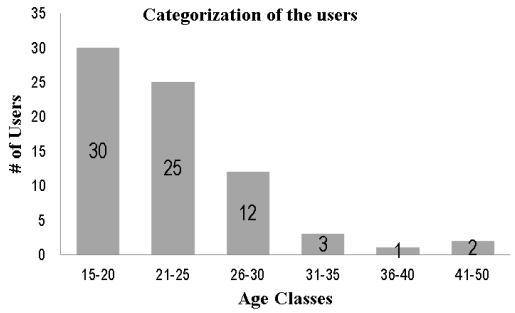


Figure 6: User's age classes

Based on the Figure 6, most of the users have ages in the range of 15 to 25. By assessing the table UserRates (which is a table related to the application, including user rates about the suggestions in the validation page by the users), the quantity of liked music tracks which every user has determined, and also according to the equation (9), the outcome using a SQL query that was executed in Microsoft SQL Server. Figure 7 shows how the results can be obtained utilizing a SQL query.

The results from the Figure 7 are used for estimation of recall and precision which can be presented in Table 1.

```
SELECT userid AS Userid,
        COUNT(userid) AS Recommendations,
        SUM (userrate) AS Likes,
        COUNT(userrate) - SUM(userrate) AS Unlikes
FROM  UserRates
GROUP BY userid
```

Figure 7: The SQL query used for preparing the result

As shown in Table 1, the information is based on the users. Accordingly Figure 8 illustrates a graph of MAE values for each user.

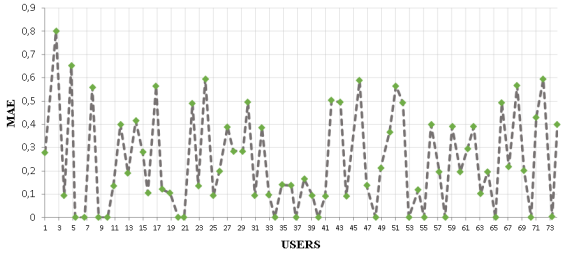


Figure 8: MAE for all users

The Figure 9 shows the number of unliked recommended tracks along with the number of recommended tracks presented to each user.

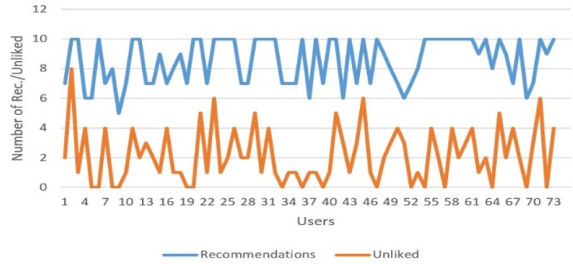


Figure 9: The number of recommended music tracks for each user versus the numbers of unliked recommended music tracks

The total MAE for the all users working with SARSIS can be estimated as equation (13).

$$MAE = \frac{157}{625} = 0{,}2512 \qquad (13)$$

The other metrics for evaluation of the model are recall and precision. Table 2 explains how these two metrics are defined.

Table 1: The information of results.

User ID	Recommendations	Likes	Unlikes	Interesting	Precision per user	Recall per user
1000000000	7	5	2	12	0,714286	0,294118
1100110011	10	2	8	0	0,200000	1,000000
1111111111	10	9	1	7	0,900000	0,562500
1147567876	6	2	4	1	0,333333	0,666667
1221344356	6	6	0	14	1,000000	0,300000
1234567891	10	10	0	37	1,000000	0,212766
1652964028	7	3	4	14	0,428571	0,176471
1740294068	8	8	0	21	1,000000	0,275862
1740331941	5	5	0	18	1,000000	0,217391
1740364295	7	6	1	6	0,857143	0,500000
1740476999	10	6	4	18	0,600000	0,250000
1740494970	10	8	2	42	0,800000	0,160000
1740601920	7	4	3	1	0,571429	0,800000
1740751698	7	5	2	11	0,714286	0,3125
1740763777	9	8	1	24	0,888889	0,250000
1740841891	7	3	4	16	0,428571	0,157895
1740925823	8	7	1	14	0,875000	0,333333
1741361461	10	10	0	14	1,000000	0,416667
1741375827	10	5	5	21	0,500000	0,192308
1741422701	7	6	1	5	0,857143	0,545455
1741453690	10	4	6	9	0,400000	0,307692
1741726591	10	9	1	9	0,900000	0,500000
1741805090	10	8	2	7	0,800000	0,533333
1741912891	7	5	2	7	0,714286	0,416667
1741922089	10	5	5	16	0,500000	0,238095
1741975565	10	9	1	11	0,900000	0,450000
1742013937	10	6	4	5	0,600000	0,545455
1742018246	10	9	1	4	0,900000	0,692308
1742046509	7	7	0	10	1,000000	0,411765
1742059457	7	6	1	6	0,857143	0,500000
1742113419	7	6	1	8	0,857143	0,428571
1742227341	10	10	0	21	1,000000	0,322581
1742328407	10	9	1	14	0,900000	0,391304
1742335942	10	5	5	30	0,500000	0,142857
1742351387	6	3	3	7	0,500000	0,300000
1742380727	10	9	1	18	0,900000	0,333333
1742386431	7	4	3	2	0,571429	0,666667
1742388991	10	4	6	14	0,400000	0,222222
1742413080	7	6	1	10	0,857143	0,375000
1742428819	10	10	0	25	1,000000	0,285714
1742449948	9	7	2	12	0,777778	0,368421
1742454216	8	5	3	23	0,625000	0,178571
1742531407	7	3	4	18	0,428571	0,142857
1750467534	6	3	3	3	0,500000	0,500000
1750598353	7	7	0	12	1,000000	0,368421
1752428819	8	7	1	17	0,875000	0,291667
1754624498	10	10	0	7	1,000000	0,588235
1754624499	10	6	4	45	0,600000	0,117647
1756797366	10	8	2	13	0,800000	0,380952
1756998124	10	10	0	15	1,000000	0,400000
1757037179	10	6	4	2	0,600000	0,750000
1757052811	10	8	2	18	0,800000	0,307692
1757144315	10	7	3	35	0,700000	0,166667
1757594752	10	6	4	3	0,600000	0,666667
1757755888	9	8	1	17	0,888889	0,320000
1810374146	10	8	2	10	0,800000	0,444444
1920332022	10	8	2	41	0,800000	0,163265
1940524695	6	6	0	23	1,000000	0,206897
1940548276	7	4	3	3	0,571429	0,571429
1943149638	10	4	6	16	0,400000	0,200000
1960167413	9	9	0	36	1,000000	0,200000
1987835301	10	6	4	25	0,600000	0,193548

Table 2: The relations between concepts

	Recommended	Not Recommended (Interests)
Liked	True positive (Liked recommended music tracks)	False Negative (Interesting music tracks for users in Main page)
Unliked	False Positive (Unliked recommended music tracks)	True Negative (-)

To generate a list of false negative items it is necessary to consider the music tracks in which users interest. This list can be prepared using a SQL query which is depicted in Figure 10.

Based on the provided definitions in Table 2 and the data from Table 1 the graphs of recall and precision based on the users are estimated and show in Figure 11 separately, while another graph presents the recall values based on the precision values in Figure 12.

In brief the value of 0,7498 is estimated as a total precision of the accomplished case study using the suggested model.

```
SELECT userid, COUNT(userid) AS fn
FROM   Interests
GROUP BY userid
ORDER BY userid
```

Figure 10: The SQL query used for preparing the False Negative (fn) values

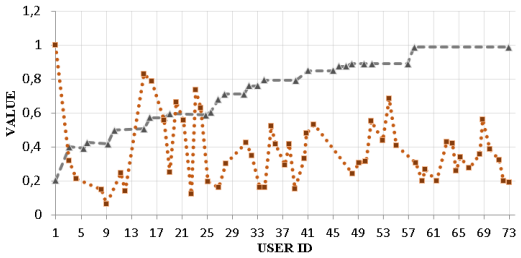


Figure 11: Precision (▲) and Recall (■) curves

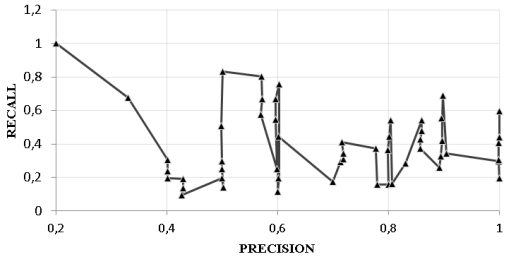


Figure 12: Graph of recall based on precision

7. Discussion

The current research has described a novel framework including special specifications and advantages. The businesses on social network are able to employ the benefits of the proposed model as a part of their e-commerce solutions. Although the proposed methodology was suggested in general, it was necessary to validate the mentioned solution on at least one social network as a case study and observe the efficiency of the model. For this purpose, a web application was developed and a dataset was crawled and saved to implement the idea of the methodology so that the users can browse the web application and have their own activities on the application to express their indirect or direct preferences. A semantic engine was responsible to act as a part of recommendation generation and when the users finished their activity, they could rate the recommended items. One of the challenges in developing the case study was the selection of a proper social network that eventually the social network last.fm was chosen. As indicated in [27] the recommender system employed in `last.fm` only uses a collaborative filtering as a standard recommender technique, whereas the method of suggested framework provides the advertisements using a hybrid recommender system. Hence the more accurate recommendations can be observed with SARSIS rather that with `last.fm` since in SARSIS the features of other recommender techniques as context-aware, demographic and content-based filtering are also used that can make recommendations closer to the users' interests. Simply, it is clear to see the recommendations by SARSIS have more accuracy in comparison with `last.fm`.

As a further study, more similar recommender systems were compared with SARSIS and interesting findings were discovered as the positive

Table 3: Comparison of similar Recommender Systems with SARSIS

RS model	Features					feedback	Similarity Metrics	RS techniques	Evaluation Metrics	Dataset	Cold-start overcome
	genre	tag	social rank	time	location						
SARSIS (Proposed)	✓	✓	✓	✓	✓	User rating	Pearson correlation, kNN	CB, CF, CA, Demo	Precision& Recall, MAE, RMSE	Last.fm (137685 tracks, 2125 artists)	Tag based, content based, ranking aggregation.
Pseudo-tag [22]	✓	✓	✓	χ	✓	χ	kNN	Pseudu-tag&tag	Precision & Recall	(3174 track, 764 artist)	Pseudo-tag&tag.
CAMRST [23]	χ	✓	✓	χ	χ	User rating	cosine similarity	CF, CA	Precision & Recall, F1	Last.fm (2747 users, 7805 items)	χ
RABCRS [24]	✓	χ	χ	✓	χ	User rating	Clustering	CF, Demo	Accuracy, Complexity	MovieLens (943 users, 1682 movies)	Clustering, ranking Aggregation
TIIREC [25]	✓	✓	χ	χ	χ	User rating	Bayesian personalized ranking	CF	Recall	Last.fm (1529 users, 8669 items), Yelp (16826 users, 14902 items)	Bayesian personalized ranking

achievements of the current proposed framework.

The quality of recommendations is increased when a recommender algorithm uses both content-based filtering and tag-based system along with acceptable number of tags [22]. According to the summarized information in Table 3, the excellence of proposed model is that SARSIS uses a tag-based system along with a content-based recommender system which totally can equally or more efficiently overcome the cold-start problem than the existing similar models. The more evaluation metrics including precision and recall, MAE and RMSE which were accomplished for SARSIS in comparison with the other models, proves that SARSIS has a better efficiency in terms of recommendation's quality. The mechanism of proposed model benefits the advantages of four standard techniques (content-based, collaborative filtering, context-aware and demographic filtering) and as a result, more accurate recommendations are presented to the users.

Both Pearson correlation and kNN have been used in the proposed model which helps find similarities faster than the other metrics [41]. Furthermore, SARSIS uses user rating which improves the quality of recommendations [17]. In the SARSIS framework, all of studied features, including genre, tag, social rank, time and location, have been utilized, while they have not been considered completely in the other similar models.

The results demonstrated that the effectiveness of the planned case study, as an example for the model, was satisfactory. For achieving this point, an assessment routine as the Mean Absolute Error was utilized and determined to express the exactness of the system. Despite the fact that the estimation of MAE for entire of the web application was not exceptionally low but rather it was promising and tolerable. One reason about the estimation of MAE which was somewhat moderately high after interacting with a portion of the users, was that there is no probability of finding and listening a review for a part of the music tracks.

It means that the there was no music preview

for the selected songs and it was a noise for the framework. Thus, they could not probably like those music tracks and as a result, the quantity of liked music tracks was diminished that affected straightforwardly in evaluating of MAE. Thus, if it was conceivable to choose a web service with more complete resources of music tracks, totally the estimation of MAE could be diminished appropriately. However, the issue was that after doing a research and looking at numerous sites as the sources of music tracks which could be utilized for playing the previews, the best decision among recognized sites was Spotify.

Additionally, in view of the Figure 11 and Figure 12, it was conceivable to see positive qualities for precision and recall for the users. Altogether, the outcomes and the accumulated information from user rates which mirrored their opinion about the proposed model, demonstrated that they were significantly satisfied about the quality of the recommendations. Along these lines, and based on the provided information, we can infer that if the model can be actualized on a social network and utilize semantic strategies to give ads, the outcomes will have enough performance for the business which uses the suggested framework.

8. Conclusion

In this study a hybrid recommender system framework was described including novel approaches to reduce the error of calculations. The popular problems in recommender systems comprise cold-start, scalability and sparsity that using tag-based, content-based and ranking aggregation techniques in the suggested recommender model, it was possible to overcome these problems. The main concentration in this study was the increment of accuracy for the recommendations that was possible to be accomplished using a semantic method along with the combination of four standard recommender technique. For increasing the probability of discovering recommendations which could be very similar to the user's exact expectations and interests, a semantically enriched solution was utilized while the classical recommender methods could not cope with such important purpose properly. In this work, the actual relationships between concepts such as clients and products on social network were considered as the pure concept of semantic technology that can declare the user interests. By evaluating the experimental outcomes, a considerable value of user satisfaction was met. As the other strength point of the framework, the recommender system could feed the user opinions about the recommendations using a rating system and these feedbacks update the dataset so that the user's opinions are used in the next rounds of recommendation process for generating more accurate recommendations.

As a limitation of the study, there was not any dataset which can be matched to the framework's specification. Therefore, by developing an application, a new dataset from the social network `last.fm` as a case study was prepared and used for the evaluation of the research.

The last.fm is a popular social network with a high number of users and its data can be a suitable choice to be used for the proposed recommender framework. For implementing the recommender solution, a web application was developed and alongside, an extensive dataset including social network artists, music tracks and their metadata were gathered from last.fm. The social network profits a simple and easy to use RESTful API which could help in developing the web application. The superiority of gaining such robust dataset with huge number of records is that the users of web application can observe stable and logical results. For the future works, it is possible to: Firstly, specify a more complete security solution with different levels of access control for the recommender system, more than the existing single sign on system such as two factor authentication. Secondly, it is better to run the web application more times to obtain a higher volume of information by the user activities and consequently perform a more complete evaluation on the gathered data to get more satisfaction for the users. Thirdly, to represent more complete details of products to be shown for the users that can help users decide about rating the products more conveniently. Fourthly, in case of emerging

or finding any new social network in the future which can be suited to the proposed model, it is better to implement the model on more social network. The requirements for considering such social network would be usable API with simple syntax for development. Finally, it is interesting to run the model using other datasets.

9. References

[1] T. Feltwell, C. Elsden, J. Vines, and S. Lawson, "Monzo + IFTTT: Everyday Automation through Programmable Money," in *Conference: CHI 2019 workshop on Everyday Automation Experience (AutomationXP'19)*, Glasgow, UK., 03 2019.

[2] Y. Acikgoz, "Employee recruitment and job search: Towards a multi-level integration," *Human Resource Management Review*, vol. 29, no. 1, March 2019.

[3] A. Meroño-Peñuela, A. Ashkpour, M. van Erp, K. Mandemakers, L. Breure, A. Scharnhorst, S. Schlobach, and F. van Harmelen, "Semantic Technologies for Historical Research: A Survey," *Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability an IOS Press JournalSearch*, vol. 6, no. 6, pp. 539–564 2012.

[4] E. Karan and J. Irizarry, "Extending BIM interoperability to preconstruction operations using geospatial analyses and semantic web services," *Automation in Construction*, vol. 53, pp. 1–12, 2015.

[5] C. Martínez-Cruz, C. Porcel, J. Bernabe-Moreno, and E. Herrera-Viedma, "A model to represent users trust in recommender systems using ontologies and fuzzy linguistic modeling," *Information Sciences*, p. 102–118, 2015.

[6] O. Nilashi, M.and Ibrahi and K. Bagherifard, "A Recommender System Based on Collaborative Filtering Using Ontology and Dimensionality Reduction Techniques," *Expert Systems with Applications*, vol. 92, pp. 507–520, 2017.

[7] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, "The Semantic Web – ISWC 2018," in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

[8] V. Espín, M. Hurtado, and M. Noguera, "Nutrition for Elder Care: A nutritional semantic recommender system for the elderly," *Expert Systems*, vol. 33, no. 2, p. 201–210, 2015.

[9] R. Principe, B. Spahiu, M. Palmonari, A. Rula, F. De Paoli, and A. Maurino, "The semantic web : ESWC 2018 satellite events, Heraklion, Crete, Greece, June 3-7, 2018 : revised selected papers," in *Lecture notes in computer science*, A. Gangemi, Ed. Springer, 2018, vol. 11155, ch. ABSTAT 1.0: Compute, Manage and Share Semantic Profiles of RDF Knowledge Graphs, pp. 170–175.

[10] D. Hanauer, D. Wu, L. Yang, Q. Mei, K. Murkowski-Steffy, V.G. Vydiswaran, and K. Zheng, "Development and Empirical User-Centered Evaluation of Semantically-based Query Recommendation for an Electronic Health Record Search Engine," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 67, pp. 1–10, 017.

[11] M. Niknam and S. Karshenas, "Integrating distributed sources of information for construction cost estimating using Semantic Web and Semantic Web Service technologies," *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 222–238, 2015.

[12] S. Chuprina, V. Alexandrov, and N. Alexandrov, "Using Ontology Engineering Methods to Improve Computer Science and Data Science Skills," *Procedia Computer Science*, vol. 80, pp. 1780–1790, 2016.

[13] M. A. Chauhan, M. A. Babar, and Q. Z. Sheng, "A Reference Architecture for provisioning of Tools as a Service: Meta-model, Ontologies and Design Elements," *Future Generation Computer Systems*, vol. 69, pp. 41–65, 2017.

[14] F. Gandon, M. Sabou, H. Sack, C. D'Amato, P. Cudré-Mauroux, and A. Zimmermann, *The Semantic Web. Latest Advances and New Domains12th European Semantic Web Conference, ESWC 2015, Portoroz, Slovenia, May 31 – June 4, 2015. Proceedings*. Springer, 2015, vol. LNCS 9088.

[15] K. Ohei and R. Brink, "Web 3.0 and Web 2.0 Technologies in Higher Educational Institute: Methodological Concept towards a Framework Development for Adoption," *International Journal for Infonomics*, vol. 12, no. 1, pp. 1841–1853, 2019.

[16] M. Schatten, J. Ševa, and B. Okreša-Đurić, ". An Introduction to Social Semantic Web Mining & Big Data Analyticsfor Political Attitudes and Mentalities Research," *European Quarterly of Political Attitudes and Mentalities,*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2015.

[17] X. Amatriain, J. Pujol, N. Tintarev, and N. Oliver, "Rate it again: Increasing recommendation accuracy by user re-rating," in *Conference: Proceedings of the 2009 ACM Conference on Recommender Systems, RecSys 2009, New York, NY, USA, October 23-25*, 2009.

[18] J. Hodges, K. Garcia, and S. Ray, "Semantic Development and Integration of Standards for Adoption and Interoperability," *Computer* , vol. 50, no. 11, pp. 26–36, 2017.

[19] A. Jamshidnezhad and M. D. Jan-Nordin, "Challenging of Facial Expressions Classification Systems: Survey, Critical Considerations and Direction of Future Work," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 9, p. 1155–1165, 2011.

[20] M. Rawashdeh, M. Shorfuzzaman, A. Artoli, M. S. Hossain, and A. Ghoneim, "Mining tag-clouds to

improve social media recommendation," *Multimedia Tools and Applications* , vol. 76, no. 20, p. 21157–21170, 2016.

[21] R. Colomo-Palacios, F. García-Peñalvo, V. Stantchev, and S. Misra, "Towards a social and context-aware mobile recommendation system for tourism," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 38, no. 2, p. 505–515, 2017.

[22] B. Horsburgh, S. Craw, and S. Massie, "Learning pseudo-tags to augment sparse tagging in hybrid music recommender systems," *Artificial Intelligence*, vol. 219, p. 25–39, 2015.

[23] M. Alhamid, M. Rawashdeh, M. Hossain, A. Alelaiwi, and A. El Saddik, "Towards context-aware media recommendation based on social tagging," *Journal of Intelligent Information Systems*, vol. 46, p. pages499–516, 2016.

[24] S. Lestari, T. B. Adji, and A. E. Permanasari, "Performance Comparison of Rank Aggregation Using Borda and Copeland in Recommender System," in *2018 International Workshop on Big Data and Information Security (IWBIS)*, Jakarta, 2018, pp. 69–74.

[25] L. Yu, J. Huang, G. Zhou, C. Liu, and Z.-K. Zhang, "TIIREC: A Tensor Approach for Tag-Driven Item Recommendation with Sparse User Generated Content," *Information Sciences*, vol. 411, p. 122–135, 2017.

[26] A. Jamshidnezhad, A. Azizi, S. Shirali, S. Rekabeslamizadeh, M. Haddadzadeh, and Y. Sabaghan, "Evaluation of Suspected Pediatric Appendicitis with Alvarado Method Using a Computerized Intelligent Model," *International Journal of Pediatrics* , vol. 4, no. 3, 2016.

[27] A. Pazahr, J. J. Samper-Zapater, F. García-Sánchez, C. Botella, and R. Martínez, "Semantically-enhanced advertisement recommender systems in social networks," in *iiWAS '16: Proceedings of the 18th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and ServicesNovember 2016 Pages 179–189*, 2016, p. 179–189.

[28] F. O. Isinkaye, Y. O. Folajimi, and B. A. Ojokoh, "Recommendation systems: Principles, methods and evaluation," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 261–273, 2015.

[29] F. Isinkaye, Y. O. Folajimi, and B. Ojokoh, "Recommendation systems: Principles, methods and evaluation," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 261–273, 2015.

[30] R. Logesh, V. Subramaniyaswamy, M. Devarajan, N. Senthilselvan, A. Sasikumar, S. Palani, and G. Manikandan, "Dynamic particle swarm optimization for personalized recommender system based on electroencephalography feedback," *Biomedical Research (India)*, vol. 28, pp. 5646–5650, 2017.

[31] R. Katarya and O. Verma, "A collaborative recommender system enhanced with particle swarm optimization technique," *Multimed Tools Appl*, vol. 75, p. 9225–9239, 2016.

[32] L. Piras and G. Giacinto, "Information fusion in content based image retrieval: A comprehensive overview," *Information Fusion*, vol. 37, pp. 50–60, 2017.

[33] A. Ghabayen and S. A. Mohd Noah, "Using Tags for Measuring the Semantic Similarity of Users to Enhance Collaborative Filtering Recommender Systems," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (IJASEIT)*, vol. 7, pp. 2063–2070, 2017.

[34] Y. Lei, L. Chen, and Z. Guan, "Cloth Recommender System Based on Item Matching," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 533, no. 1, p. 012044, 2019.

[35] M. Scholz, V. Dorner, G. Schryen, and A. Benlian, "A configuration-based recommender system for supporting e-commerce decisions," *European Journal of Operational Research*, vol. 259, no. 1, pp. 205–215, 2017.

[36] H.-J. Xue, X. Dai, J. Zhang, S. Huang, and J. Chen, "Deep Matrix Factorization Models for Recommender Systems," in *Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-17)*, 2017, p. 3203–3209.

[37] H. Lim and H.-J. Kim, "Item recommendation using tag emotion in social cataloging services," *Expert Systems with Applications*, vol. 89, pp. 179–187, 2017.

[38] N. Hariri, B. Mobasher, and R. Burke, "Using social tags to infer context in hybrid music recommendation," in *WIDM '12: Proceedings of the twelfth international workshop on Web information and data management*, November 2012, p. 5.

[39] U. Boryczka and M. Bałchanowski, "Differential Evolution in a Recommendation System Based on Collaborative Filtering," in *Computational Collective Intelligence. ICCCI 2016. Lecture Notes in Computer Science*, N. Nguyen, L. Iliadis, Y. Manolopoulos, and B. Trawiński, Eds. Springer, Cham, 2016, vol. 9876.

[40] P. S. da Conceição-Moreira and D. Fukumi-Tsunoda, "LAST.FM Songs Database: A Database for Musical Genre Classification," *Inst. Syst. Technol. Information, Control Commun.*, 2018.

[41] D. Wei, M. Chun, and W. Qing, "Autonomous Learning Recommendation Algorithm Based on K-Means and K-Nearest Neighbor," in *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence ATCI 2019*, 2019, pp. 1235–1244.

Organo-clay material as coalescer oil filter in the treatment of oil production waters

Johnny Bullón *,[a], Jesús David Prato [a], Victoria Mousalli [a,b], Franklin Salazar [a], Leonardo Rennola [c]

[a]*Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP), Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.*
[b]*Departamento de Geología General, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.*
[c]*Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial (LMSSI), Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.*

Abstract.- A crude oil coalescent filter was constructed for treating oil production waters using clay material from the Venezuelan Andes region. The clay minerals were burned and their surfaces treated with a mixture of cationic and nonionic surfactant. After the treated clays were used as a filling material in the vertical adsorption column, in which synthetic waters of oil production were circulated. The results indicate that when the production waters goes through the clays filters, the oil droplets size increases showing that these clays are able to induce the coalescence of oil drops.

Keywords: clay; filters; oils production water; coalescence.

Material organo-arcilloso como filtro coalescedor de crudo en el tratamiento de aguas de producción petrolera

Resumen.- Se construyó un filtro coalescedor de crudo para aguas de producción petrolera, utilizando material arcilloso de la región de los Andes venezolanos. Las arcillas fueron calcinadas y se les realizó un tratamiento superficial de hidrofobación, con una mezcla de surfactantes catiónico y no iónico. El material arcilloso obtenido se utilizó como relleno de una columna de adsorción vertical, a través de la cual se hizo circular aguas sintéticas de producción petrolera. Los resultados indican que al pasar las aguas de producción por el filtro, las gotas de crudo aumentan sus tamaños de partículas, demostrando así que las arcillas empleadas son materiales adecuados para la coalescencia de las gotas de petróleo.

Palabras clave: arcilla; filtros; aguas de producción petrolera; coalescencia.

Recibido: 10 de febrero, 2020.
Aceptado: 27 de abril, 2020.

1. Introducción

Las aguas aceitosas provenientes de procesos de la industria petrolera, petroquímica, alimentos, metalúrgica y minera, son unos de los principales problemas ambientales a nivel mundial debido a que corresponden a residuos de producción regular que requieren de tratamientos especiales para su disposición venial en cuerpos de agua. La industria petrolera particularmente genera aguas aceitosas en todas sus etapas, desde la producción hasta procesos de distribución y expendio [1, 2]. Especialmente durante el proceso de producción petrolera, se generan grandes volúmenes de aguas asociadas al crudo, denominadas *aguas de producción petrolera*. Estas aguas, luego de separadas del crudo en los tanques sedimentadores, en los separadores API y algunos procesos de flotación, entre otros procesos [3], contienen cantidades inferiores a 200 ppm de crudo y tamaños de gotas cercanos a un micrómetro. Estas diminutas gotas de crudo proporcionan al agua una gran turbidez. Su tratamiento con agentes floculantes

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*jbullon@ula.ve (J. Bullón)

se hace difícil, pues debido a la baja concentración de partículas son poco probables las interacciones entre las gotas para propiciar la coalescencia de las mismas. Es por ello que los tratamientos recomendados sean físicos, como la flotación por microburbujas de aire, filtración con membranas, filtros de arenas y filtros coalescedores [4]. Los filtros coalescedores son dispositivos creados para facilitar la coalescencia de las gotas dispersas en una fase en la que no es miscible, puede ser una fase polar o apolar. En la literatura especializada se encuentran numerosos trabajos sobre filtros coalescedores con rellenos oleofobos e hidrófobos, dependiendo de la aplicación requerida. En una gran parte de estos trabajos la aplicación se refiere a la eliminación de pequeñas gotas de agua en hidrocarburos [5, 6, 7, 8, 9]. En nuestro caso, se corresponde a emulsiones diluidas de gotas de aceite en agua que simulan aguas de producción petrolera (Figura 1). La tecnología de filtros coalescedores representa bajos costos de inversión en materiales renovables, bajo consumo de energía y son utilizados en las primeras etapas de separación para el tratamiento de hidrocarburos y sus derivados. Generalmente cumplen dos funciones: primero, coalescen (combinan) las pequeñas gotas de hidrocarburos emulsificadas en agua, muy dispersas, en gotas de mayor tamaño, y segundo, en algunos casos, retienen los contaminantes en forma de partículas. El funcionamiento y la eficiencia de los filtros coalescedores depende de: los materiales de relleno, la mojabilidad, el diámetro de poro del material filtrante, las características de los fluidos a separar, y de las condiciones de operación del proceso [10].

A partir de esto, muchas investigaciones siguen haciendo el esfuerzo por mejorar la eficiencia en la separación a través de nuevos materiales amigables con el ambiente como sólidos micronizados, granulados o aglomerados (arcillas y arcillas organofílicas, polímeros y resinas, fibra de vidrio), fibras de origen vegetal y sintéticas (fibras de celulosa, bagazo de caña, conchas de granos y aserrín) [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19], nuevas formas y estructuras de coalescedores (relación de altura, ancho o diámetro, mojabilidad, etc)

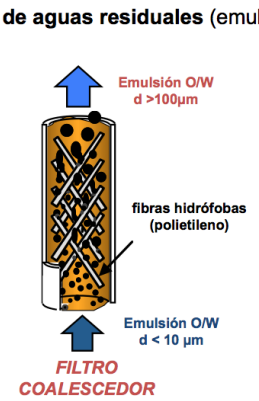


Figura 1: Principio del funcionamiento de un filtro coalescedor de emulsiones [5].

[17, 20, 21], variando las condiciones de operación (velocidad superficial) [22] y considerando las características de la emulsión (concentración de la emulsión, tamaño de gota, características del surfactante) [23]. Debido a que aun no están muy claros los mecanismos de coalescencia, la optimización de estos sistemas están determinados por el ensayo o las pruebas experimentales. En el presente estudio se propone el uso de arcillas tratadas con una mezcla de surfactantes (catiónico-no iónico), como relleno para filtros coalescedores. El objetivo, es generar un material que promueva la coalescencia de las diminutas gotas de crudo en su superficie y salgan del filtro con un mayor tamaño, que permita luego su separación.

2. Metodología

2.1. Selección y acondicionamiento del material de relleno

Se tomaron muestras de rocas de 3 afloramientos diferentes de la Formación Colón, en la vía a la población de Jají, estado Mérida. Las coordenadas de las zonas de muestreo se encuentran indicadas en la Figura 2. El primer punto (afloramiento 1), posee latitud 8°34'21.29"N y longitud 71°19'22.73"E; para el punto 2 (afloramiento 2) se tiene latitud 8°34'24.30"N y longitud 71°19'24.40"E; finalmente, para el punto 3 (afloramiento 3) se tiene altitud 8°34'19.18"N y longitud 71°19'33.57"E.

Las muestras de rocas fueron trituradas durante 15 minutos en un molino de bola marca Retsch



(Fuente: Google Earth)

Figura 2: Ubicación de las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

(Alemania), modelo MM2, en cargas de 5 gramos. Una vez molidas las muestras, se clasificaron en un tamizador marca Tyler, modelo RX-29, con un tamiz de 200 mesh. Con cada una de las muestras molidas y tamizadas se preparan masas moldeables, generadas por medio de la mezcla de 100 gramos de cada material arcilloso con 40 mL de agua destilada. Estas suspensiones acuosas se moldean por medio de una jeringa de 60 mL sin aguja, para darle una forma alargada y cilíndrica, las cual se cortan con dimensión aproximada de 1 centímetro de largo, (Figura 3), y se deja secar alrededor de 20 horas a temperatura ambiente. Luego que las estructuras están secas, se procede a calcinarlas en una mufla a 800 °C durante 3 horas. Esto se realiza con el fin de generar en las muestras una estructura estable y compacta, que le permita no disolverse en contacto con el agua. Una porción de cada muestra fue triturada y tamizada de nuevo, y fueron caracterizadas por espectrofotometría infrarrojo en espectrofotómetro FTIR Bruker, modelo Tensor 27, con adaptador ATR (attenuated total reflectance) modelo MIRacle de Pike Technologies. Igualmente, fueron caracterizadas por difractometría de rayos X con un difractómetro Siemens D5005, equipado con un tubo de rayos-X con radiación de Cobre (CuKalfa).

2.1.1. Tratamiento superficial

Una vez calcinadas y moldeadas las muestras, se le realiza un tratamiento superficial por adsorción de una mezcla de surfactantes. Este procedimiento se realiza con el fin de modificar parcialmente la



Figura 3: Cilindros de arcillas de 3 mm de largo

mojabilidad de la superficie de las arcillas. Para ello las muestras se colocan en contacto durante 10 horas con una disolución acuosa que contiene una mezcla de surfactantes catiónicos (Prepagen de Clariant) y no iónicos (alcoholes etoxilados de Oxiteno Andina). Al pasar las 10 horas, se filtran las muestras y se dejan secar a temperatura ambiente por 48 horas. Estas muestras conforman el relleno del filtro coalescedor.

3. Preparación de la dispersión de crudo en agua

Se preparó un volumen de un litro de una dispersión de crudo en agua destilada. Para ello, se procede a realizar una solución madre; es decir, una muestra de concentración de crudo elevada alrededor de 600 ppm con la finalidad de poder diluir la muestra madre, para obtener concentraciones inferiores que pudiesen variar desde 20 hasta 100 ppm. Como agente dispersante, se utiliza el pirofosfato de sodio ($Na_4P_2O_7$) en una concentración del 1 % p/p. En este sentido, la preparación de la dispersión se realiza utilizando los siguientes instrumentos: Agitador Ultraturrax IKA. Pirofosfato de sodio, crudo venezolano (Rosa mediano) con agua destilada. La dispersión se obtiene mezclado el agua, el pirosfosfato de sodio y el crudo, agitándose en el ultraturrax durante

5 min a 2000 rpm. En la Tabla 1, se muestran las características del crudo utilizado.

Tabla 1: Propiedades del los crudo utilizado

Características	Rosa Mediano
Viscosidad a 100 °F (cSt)	49,34
Gravedad API	24,6
Contenido de asfaltenos (%)	4,3

3.1. Pruebas de filtración de aguas de producción petroleras (sintéticas)

Se instaló un piloto experimental para realizar las pruebas de filtración de las aguas de producción petroleras sintéticas, con la utilización del filtro coalescedor. Para ello se dispone de un vaso de precipitado de 1 L, en el cual se vierte el agua sintética de producción petrolera. Este recipiente se mantiene agitado mediante un agitador magnético Se dispone de una bomba peristáltica, marca Amicon (Grace Company), modelo LP-1. El filtro coalescedor se construye con una columna de vidrio de 2 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales se rellenan con cada una de las arcillas tratadas superficialmente. Como se muestra en la Figura 4.

El vaso, la bomba peristáltica y la columna de relleno se conectan entre ellos con tuberías de tygón. El esquema del circuito se muestra en la Figura 5.

Para las pruebas de filtración, se hace circular el agua de producción petrolera sintética mediante la bomba peristáltica, manteniendo un flujo de 0,5 L/min, a través de la columna. El líquido se recircula al tanque de alimentación (circuito cerrado). El proceso de filtración se realiza durante 60 minutos. Se toman muestras del agua alimentada y luego de transcurrida una hora de iniciado el proceso de filtración. A las muestras de agua de producción petrolera se les determina la distribución de tamaño de gotas de crudo con el medidor de tamaño MasterSizer, modelo Hydro 2000MU de la empresa Malvern. Se reportan diámetros en volumen Dv(0,1), Dv(0,5), Dv(0,9) y la amplitud de la distribución (span).



Figura 4: Columna empacada con arcillas (filtro coalescedor)

3.1.1. Medidas de ángulo de contacto de las arcillas

El ángulo de contacto entre el agua y la superficie de las arcillas se determinó, antes y después de tratada con la mezcla de surfactantes (catiónico y no iónico). Para ello se utilizaron muestras de arcillas calcinadas, trituradas y tamizadas, con y sin

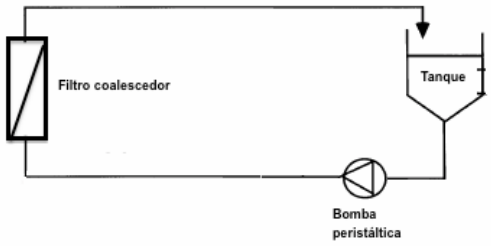


Figura 5: Esquema del circuito de filtración.

tratamiento con la mezcla de surfactantes catiónico, antes y después del proceso de filtración del agua de producción petrolera. La determinación se realiza aplicando el método de ascenso capilar Washburn [24, 25], utilizando el tensiómetro Kruss, modelo K100. Se considera el n-hexano como líquido de referencia para caracterizar el medio poroso por el que se produce el ascenso capilar. Es importante resaltar, que al considerar el n-hexano como referencia se establece como fluido de mojabilidad completa, por ende considera que el ángulo de contacto es cero.

4. Resultados

4.1. Caracterización de las de muestras

Las muestras de roca o sustrato utilizadas en esta investigación corresponden a tres afloramientos de la Formación Colón, cuya ubicación geográfica se describió anteriormente. De manera general, esta formación geológica de edad Cretácica y distribuida en el Flanco Surandino (Figura 6) es descrita en el Léxico Estratigráfico de Venezuela (L.E.V. II, 1970), como unas lutitas microfosilíferas gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. En el área de estudio, en los afloramientos 1, 2 y 3 corresponden a una secuencia sedimentaria lutítica, altamente friables, de color gris oscuro a marrón oscuro, con bajo grado de meteorización, realizándose pruebas de efervescencia con solución de ácido clorihídrico (1M) para determinar in situ la presencia de carbonato de calcio, para lo cual sólo las muestra del Afloramiento 3 fueron positivas al contacto con el ácido.

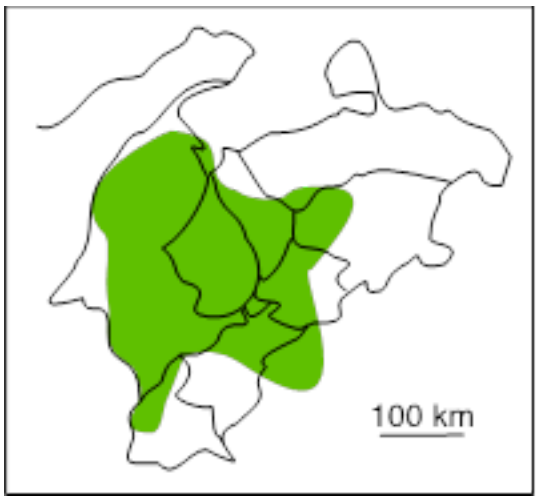


Figura 6: Ubicación y distribución geográfica de la Formación Colón (formación geológica de edad Cretácica en el Flanco Surandino, en Venezuela).

Para complementar la caracterización de las muestras se realizaron análisis por espectrofotometría de infrarrojo (FTIR-ATR) y difracción de rayos X. La Figura 7 presenta los espectros de FTIR de los Afloramientos. En estos espectros se pueden observar las bandas características para minerales siliciclásticos de arcilla que corresponden principalmente al enlace Si – O, con banda de absorción 1050 cm^{-1} correspondiente a tensión asimétrica, banda entre 800 y 780 cm^{-1} correspondiente a tensión simétrica. También se presenta la banda de absorción en 694,05 cm^{-1} que evidencia la presencia de silicato en forma cristalina (Cuarzo) [26].

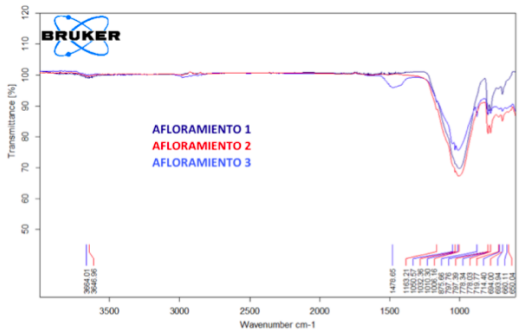


Figura 7: Espectro de infrarrojo de muestras de afloramiento de la Formación Colón.

La presencia de aluminosilicatos se evidencia por la banda de absorción en 3646,63 cm^{-1}

asociada a la tensión en enlace OH – Al y la banda ancha en aproximadamente 1000 cm^{-1} correspondiente a la tensión de enlaces Si – 0-Al.

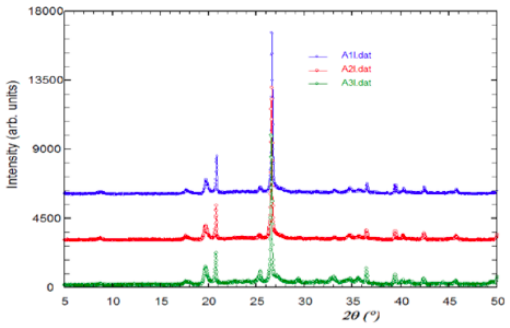


Figura 8: Espectro de difracción de rayos X de muestras de afloramiento de la Formación Colón.

Particularmente, en el Afloramiento 3 se observan dos bandas de absorción que evidencian la presencia de carbonato de calcio, una banda ancha de baja intensidad un valor máximo en 1478 cm^{-1}, que podría estar asociada a la tensión asimétrica y una banda intensa en 875 cm^{-1} asociada a flexión fuera del plano. Existe una banda débil en 714 cm^{-1} que podría asociarse a flexión dentro del plano, característica de formas cristalinas de carbonato de calcio [27, 28].

Correspondiendo con este análisis, el espectro de difracción de rayos X que se muestra en la Figura 8, evidencia señales características de especies cristalinas de los afloramientos, entre estas, la de mayor intensidad en 20,9 y 26,65 2(θ) correspondiente a cuarzo, 8,9 y 19,8 2(θ) que podrían sugerir la presencia de formas cristalinas de material arcilloso como la illita, y específicamente en el Afloramiento 3, una señal en 29,5 2(θ) que evidencia la presencia de carbonato de calcio en su forma cristalina como calcita [29].

4.2. Ángulos de contacto

En la Tabla 2 se muestran los valores de los ángulos de contacto obtenidos para las muestras minerales de los 3 afloramientos, calcinadas a 800 °C, tratadas con la solución de surfactantes y posterior a la filtración de las aguas de producción petrolera.

En la Tabla 2 se puede observar que los ángulos de contacto varían según el tipo Afloramiento

Tabla 2: Ángulo de contacto para los afloramientos tratados

Afloramiento	Calcinación a 800 °C	Tratado con surfactantes. (antes filtración)	Con crudo adsorbido (luego de filtración)
1	88.99°	81.67°	85.09°
2	75.33°	90.00°	87.03°
3	59.90°	77.35°	89.91°

y depende del tratamiento y procesamiento que haya recibido éste. Considerando la calcinación, se observa que el sustrato más hidrofílico es el afloramiento 3 con 59,90°y el menos hidrofílico es el afloramiento 1 con 88,99°. El afloramiento 2 tendría una mojabilidad intermedia. En términos generales, el tratamiento superficial con los surfactantes produce un aumento del ángulo de contacto que se reconoce como una hidrofobación de la superficie. Aunque para el afloramiento 1 se observe una leve disminución del ángulo, se puede considerar que se mantiene en el intervalo de la mojabilidad intermedia.

El cambio de mojabilidad es promovido por la adsorción de los surfactantes sobre la superficie del mineral. Si consideramos que los sustratos en estudio son superficialmente heterogéneos, la presencia de diferentes especies cristalinas y probablemente no cristalinas determinan niveles de interacción con la fase acuosa, la mojabilidad del sustrato se califica como mixta. En este caso, la presencia de silicatos, aluminosilicatos e incluso carbonatos determinan una alta afinidad por la fase acuosa. Por otro lado, inicialmente el mecanismo de adsorción del surfactante iónico sobre el sustrato mineral es del tipo interacción electrostática, debido a la atracción entre las cargas positivas asociadas al surfactante catiónico y las cargas negativas asociadas al sustrato mineral, específicamente sobre silicatos y aluminosilicatos que desarrollan carga negativa a las condiciones fisicoquímicas de las aguas de producción [30, 31, 32]. Posteriormente, a medida que aumenta la adsorción de surfactante, el mecanismo cambia y se corresponde a la adsorción por asociación, controlado principalmente por la formación de

agregados micelares y adsorción de micelas sobre la superficie. Es en esta etapa donde se favorece la adsorción del surfactante no iónico y se genera la condición donde probablemente se alcance el mayor grado de hidrofobación [33, 34].

Los valores de ángulo de contacto alcanzados con crudo adsorbido se corresponden con sustratos más hidrofobados, debido obviamente a la adherencia de crudo sobre la arcilla tratada. Es importante señalar que el Afloramiento 3 presenta el mayor aumento del ángulo de contacto debido probablemente a la mayor afinidad que tiene el crudo el sustrato relacionado con la presencia de calcita en la muestra. Algunas referencias determinan que la mayor afinidad del mineral de calcita por hidrocarburos se debe fundamentalmente a la interacción de la carga positiva que desarrolla la superficie del carbonato de calcio y el carácter aniónico de fracciones del crudo que poseen grupos carboxílicos [35, 36, 37].

En la Tabla 3, se muestran las distribuciones de los tamaños de gotas (en μm) de las diferentes dispersiones de crudo, antes y después de las pruebas de filtración.

Tabla 3: Distribuciones de los tamaños de gotas de las aguas de producción sintéticas a la entrada y salida de las pruebas de filtración sobre los filtros coalescedores. (Diámetros en volumen)

Muestra de agua	Dv(0,1) (μm)	Dv(0,5) (μm)	Dv(0,9) (μm)	Span (μm)
Afloramiento 1 Entrada	0,662	6,808	32,906	4,736
Afloramiento 1 Salida	0,094	0,870	28,483	32,640
Afloramiento 2 Entrada	0,140	1,607	35,268	21,861
Afloramiento 2 Salida	0,109	7,579	82,333	10,849
Afloramiento 3 Entrada	0,117	1,268	28,438	22,336
Afloramiento 3 Salida	0,099	1,172	100,433	85,628

En la Tabla 3 se puede observar, que las dispersiones de crudo en agua a la entrada y a la salida del filtro coalescedor presentan cambios a nivel de la distribución de tamaño de partícula evidenciado por los cambios en los parámetros estadísticos Dv(0,1), Dv(0,5), Dv(0,9) y Span. Para el Afloramiento 1, todos los valores de Dv(0,1), Dv(0,5), Dv(0,9) disminuyeron respecto de los valores presentados antes de la filtración lo que infiere que la coalescencia es ineficiente. El aumento del valor del Span se debe fundamentalmente al aumento en la diferencia entre el Dv(0,1) y Dv(0,9), sin que esto esté realmente asociado a un proceso de aglomeración de gotas. En el Afloramiento 2 los valores Dv(0,5) y Dv(0,9) aumentan, evidenciando coalescencia. El cambio mas importante lo tiene el Dv(0,9) desde 35,26 micrómetros hasta 82,33 micrómetros de diámetro de gota. El Span disminuye debido fundamentalmente al aumento en el Dv(0,5), sugiriendo un proceso de coalescencia incompleto. Si bien los mecanismos de coalescencia en filtros son muy complejos, ya que depende de las interacciones interfaciales entre las gotas y el sustrato, un aumento insuficiente del tamaño puede asociarse a la baja disponibilidad hacia sitios hidrofobados que promuevan la aglomeración de gotas de aceite [23, 38, 39]. El Afloramiento 3 presenta cambios despreciables en Dv(0,1) y Dv(0,5) y muy apreciable en el Dv(0,9) de 28,43 micrómetros hasta 100,43 lo que evidencia la coalescencia. El Span aumenta de 22,33 hasta 85,62 debido fundamentalmente al aumento del número de partículas de gran tamaño que se diferencia apreciablemente de las mas pequeñas que están por debajo de Dv(0,5). La mejora apreciable en la coalescencia de las gotas de crudo se produce en el afloramiento 3 que corresponde a un sustrato que favorece la mojabilidad por la fase oleosa debido a la presencia del carbonato de calcio [40, 41, 42]. Es probable que si existe mayor afinidad del sustrato por la fase oleica, se aumente la disponibilidad de sitios hidrofobados que permitan la adherencia de las gotas de crudo y el sucesivo aumento de la coalescencia por la cohesión entre las gotas [4].

5. Conclusiones

Las arcillas calcinadas y tratadas con la mezcla de surfactantes (catiónico y no iónico) pueden servir de relleno en filtros coalescedores.

Considerando que se mantuvieron en cada filtro las mismas condiciones hidrodinámicas de flujos, la coalescencia está determinada por las características superficiales del material de relleno. En este sentido, se concluye que el tratamiento superficial aplicado a las arcillas de un lecho empacado pueden contribuir en el proceso filtración, incrementando el tamaño de las gotas de crudo disperso en agua. La aglomeración y aumento del tamaño de las gotas de crudo disperso en el agua, puede ayudar en un posterior procedimiento de separación por flotación, por lo que actúa como un filtro coalescedor.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Profª. Asiloé Mora, del Laboratorio de Cristalografía de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, por su contribución en los análisis de los espectros de difracción de rayos X de las muestras de arcillas.

7. Referencias

[1] A. Srinivasan and T. Viraraghavan, "Removal of oil by walnut shell media," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 17, p. 8217–8220, 2008.

[2] R. K. Gupta, G. J. Dunderdale, M. W. England, and A. Hozumi, "Oil/water separation techniques: a review of recent progresses and future directions," *Journal of Material Chimestry*, vol. 5, pp. 16 025–16 058, 2017.

[3] L. Rennola, F. Salazar, A. Cárdenas, J. Bullón, y L. González, "Filtración de emulsiones crudo/agua con membranas poliméricas: influencia de las interacciones interfaciales," *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 30, pp. 410–418, 2007.

[4] L. Hui-qing and B. Zhi-shan, "Investigation of O/W emulsion separation and redispersion using fibrous PTFE bed coalescer," *Separation Science and Technology*, vol. 54, no. 7, pp. 1221–1232, 2019.

[5] J. Salager, *El mundo de los surfactantes. Módulo de enseñanza de fenómenos interfaciales*. Mérida, Venezuela: Laboratorio FIRP Universidad de los Andes, 1992.

[6] A. Gadhave, S. Mehdizadeh, and G. Chase, "Effect of pore size and wettability of multilayered coalescing filters on water-in-ULSD coalescence," *Separation and Purification Technology*, vol. 221, no. 15, pp. 236–248, 08 2019.

[7] Z. Lu, Z. Bai, H. Luo, Z. Hu, and F. Pang, "Effect and optimization of bed properties on water-in-oil emulsion separation," *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 415–424, 2018.

[8] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities," *Separation and Purification Technology*, vol. 201,no. 7, pp. 71–78, 2018.

[9] C. Chang, Z. Ji, and J. Liu, "The effect of a drainage layer on saturation and liquid distribution of oleophobic coalescence filters," *Separation and Purification Technology* , vol. 194, pp. 355–361, 2018.

[10] L. Zhaojin, B. Zhishan, L. Huiqing, H. Ziqiang, and P. Fulong, "Effect and optimization of bed properties on water-in-oil emulsion separation," *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 415–424, 2019.

[11] R. Wahi, A. Luqman Chuah, T. Choong, Z. Ngaini, and M. Nourouzi, "Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. ," *Separation and Purification Technology*, vol. 13, pp. 51–63, 2013.

[12] A. Pachathu, K. Ponnusamy, and S. K. V. Ramanan Srinivasan, "Packed bed column studies on the removal of emulsified oil from water using raw and modified bagasse and corn husk." *Journal of Molecular Liquids*, vol. 223, pp. 1256–1263, 2016.

[13] H. Moazed and T. Viraraghavan, "Coalescence/Filtration of an oil-in-water emulsion in a granular organoclay/anthracite mixture bed," *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 138, pp. 253–270, 2002.

[14] J. Li and Y. Gu, "Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds," *Separation and Purification Technology*, vol. 42, pp. 1–13, 2005.

[15] A. Cambiella, E. Ortea, and J. M. Benit, "Treatment of oil-in-water emulsions: performance of a sawdust bed filter." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 131, no. (1-3), pp. 195–199, 2005.

[16] Y. Zhou, L. Chen, X. Hu, and J. Lu, "Modified Resin Coalescer for Oil-in-Water Emulsion Treatment: Effect of Operating Conditions on Oil Removal Performance," *Industrial Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 3, pp. 1660–1664, 2009.

[17] L. Hao, Q. Yang, X. Xu, and H.-L. Wang, "Effect of the Mixed Oleophilic Fibrous Coalescer Geometry and the Operating Conditions on Oily Wastewater Separation," *Chemical Engineering Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 255–262, 2016.

[18] D. Hu, L. Li, Y. Li, and C. Yang, "Fibrous Coalescer for the Treatment of Hydrometallurgical Oil Dispersions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 55, no. 44, pp. 11 809–11 817, 2016.

[19] C. Chang, Z. Ji, and J. Liu, "The effect of a drainage layer on the saturation of coalescing filters in the filtration process. ," *Chemical Engineering Science*, vol. 160, pp. 354–361, 2017.

[20] R. Sokolović, T. Vulic, and S. Sokolovic, "Effect of bed length on steady-state coalescence of oil-in-water emulsion," *Separation and Purification Technology*,

vol. 56, pp. 79–84, 2007.

[21] N. Chawaloesphonsiya and P. Painmanakul, "Study of cutting-oil emulsion separation by coalescer process in terms of medium characteristics and bed packing," *Separation Science and Technology*, vol. 49, pp. 2960–2967, 2014.

[22] W. Gu, S. Yan, and Z. Bai, "A Study on a droplet impact on a fiber during coalescence separation: phenomena and models," *Chemical Engineering Science*, vol. 212, 2019.

[23] S. Maiti, I. Mishra, S. Bhattacharya, and J. Joshi, "Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed bed of commercial resin," *Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering aspects*, vol. 389, pp. 291– 298, 2011.

[24] A. Sielborld, A. Walliser, M. . Nardim, M. Oppliger, and J. Schultz, "Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 186, no. 1, pp. 60–70, 1997.

[25] A. Alghunaim, S. Kirdponpattara, and B. Z. Newby, "Techniques for determining contact angle and wettability of powders," *Powder Technology*, vol. 287, pp. . 201–215, 2016.

[26] C. Muller, B. Pejcic, L. Esteban, C. Pianel, M. Raven, and M. Mizaikoff, "Infrared Attenuated Total Reflectance Spectroscopy: An Innovative Strategy for Analyzing Mineral Components in Energy Relevant Systems," *Scientific Reports*, vol. 4, pp. 1–11, 2014.

[27] F. Bosch, J. Gimeno, and M. Moya, "FTIR Quantitative Analysis of Calcium Carbonate (Calcite) and Silica (Quartz) Mixtures Using the Constant Ratio Method. Application to Geological Samples," *Talanta*, vol. 58, no. 4, pp. 811–821, 2002.

[28] B. Saikia, G. Parthasarathy, and S. N.C., "Fourier transform infrared spectroscopic estimation of crystallinity in SiO 2 based rocks," *Bulletin of Materials Science*, vol. 31, no. 5, pp. 775–779, 2008.

[29] S. Al-Jaroudi, A. Ul-Hamid, A. Mohammed, and S. Saner, "Use of X-ray powder diffraction for quantitative analysis of carbonate rock reservoir samples," *Powder Technology*, vol. 175, no. 3, pp. 115–121, 2007.

[30] P. Somasundaran and L. Huang, "Adsorption/aggregation of surfactants and their mixtures at solid-liquid interfaces," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 88, no. (1-2), pp. 179–208, 2000.

[31] R. Atkin, V. Craig, E. Wanless, and S. Biggs, "Mechanism of Cationic Surfactant Adsorption at the Solid–Aqueous Interface," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 103, no. 3, p. 219–304, 2003.

[32] S. Paria and K. Khilar, "A review on experimental studies of surfactant adsorption at the hydrophilic solid-water interface," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 110, no. 3, p. 75–95, 2004.

[33] M. Thomas, J. Clouse, and J. Longo, "Adsorption of organic compounds on carbonate minerals: 1. Model compounds and their influence on mineral wettability," *Chemical Geology*, vol. 109, no. (1-4), pp. 201–213, 1993.

[34] B.-F. Hou, Y.-F. Wang, and Y. Huang, "Mechanistic study of wettability alteration of oil-wet sandstone surface using different surfactants," *Applied Surface Science*, vol. 330, pp. 56–64, 2015.

[35] D. Thompson and P. Pownall, "Surface electrical properties of calcite," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 131, no. 1, pp. 74–82, 1989.

[36] P. Sumasundaran and G. Agar, "The zero point of charge of calcite," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 24, no. 4, pp. 433–440, 1967.

[37] P. Moulin and H. Roques, "Zeta potential measurement of calcium carbonate," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 261, no. 1, pp. 115–126, 2003.

[38] G. Alther, "How to remove emulsified oil from wastewater with organoclays," *Water Engineering and Management*, vol. 148, pp. 27–29, 2001.

[39] R. Sećerov, S. Sokolović, and S. S., "Oily water treatment using a new steady-state fiber-bed coalescer," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 162, no. 1, pp. 410–415, 2009.

[40] J. Buckley and Y. Liu, "Some mechanisms of crude oil/brine/solid interactions," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 20, no. (3-4), pp. 155–160, 1998.

[41] D. Zhang, S. Liu, M. Puerto, C. Miller, and G. Hirasaki, "Wettability alteration and spontaneous imbibition in oil-wet carbonate formations," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 213–226, 2006.

[42] M. Morrow, "Wettability and Its Effect on Oil Recovery," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 1476–1484, 1990.

Determination of factors that affect the design of cryptographic algorithms by a cybernetic meta-model, validated with Q-analysis

Ali Norouzzadeh-GilMolk [a], Reza Ramazani-Khorshiddoust * [,b], Mohammad Aref [c]

[a] *Islamic Azad University, North Tehran Branch. Tehran, Iran.*
[b] *Amirkabir University of Technology. Tehran, Iran.*
[c] *Sharif University of Technology. Tehran, Iran.*

Abstract.- Encryption is the most important mechanism to protect information. A variety of factors affect the design and implementation of cryptographic algorithms, such as symmetric, asymmetric, and hash functions. In other words, all the necessary components of information security must be considered from the technical, organizational, procedural and human aspects in a model of excellence. To meet these requirements in this study, a methodology was used that enables the development of a metamodel that allows evaluating the different factors that affect cryptographic design, taking into account various attributes. The encryption metamodel has four main components: *policy and strategy*, *main processes*, *support processes*, *process control*, highlighting that the interactions between the main and support processes configure the structure of the encryption system. The evaluation of these interactions was carried out using a score allocation system, which resulted in a complex matrix, which was transformed into incidence matrices, which are addressed by means of a Q-analysis. The results of the Q-analysis indicate that The most significant group of components to develop an encryption system consists of the following: *human resources*, *R&D*, *standards and regulations*, *IT* and *standards*.

Keywords: cryptography algorithms; cybernetic meta-model; Q-analysis.

Determinación de los factores que afectan el diseño de algoritmos criptográficos por medio de un meta-modelo cibernético, validado con análisis-Q

Resumen.- El cifrado es el mecanismo más importante para proteger la información. Una variedad de factores afecta el diseño e implementación de algoritmos criptográficos, como funciones simétricas, asimétricas y hash. Es decir, todos los componentes necesarios de la seguridad de la información deben considerarse desde los aspectos técnicos, organizativos, de procedimiento y humanos en un modelo de excelencia. Para cumplir con estos requisitos, en este estudio se utilizó una metodología que posibilita el desarrollo de un metamodelo que permite valorar los diferentes factores que afectan el diseño criptográfico, teniendo en consideración diversos atributos. El metamodelo de cifrado tiene cuatro componentes principales: *política y estrategia*, *procesos principales*, *procesos de apoyo*, *control procesos*, destacando que las interacciones entre los procesos principales y de apoyo configuran la estructura del sistema de cifrado. La valoración de estas interacciones fue realizada por medio de un sistema de asignación de puntajes, lo cual resultó en una matriz compleja, que fue transformada en matrices de incidencia, que se abordan por medio de un análisis-Q. Los resultados del análisis-Q indican que el grupo de componentes más significativos para desarrollar un sistema de cifrado consta de lo siguiente: *recursos humanos*, *I+D*, *normas y reglamentos*, *TI* y *estándares*.

Palabras clave: algoritmos criptográficos; meta-modelo cibernético; análisis-Q.

Received: February 17, 2020.
Accepted: March 31, 2020.

1. Introduction

Cryptography is a main component of the world's information security to transfer data from transmitter to receiver in the safest way [1]. The security of the cryptographic systems depends on

* Correspondence author:
*e-mail:*ramazani@aut.ac.ir (R. Ramazani-Khorshiddoust)

two key factors; *strength of algorithms* and *key size*. Various cryptographic algorithms are in three types of hash functions, symmetric key and asymmetric key algorithms. Therefore, the power of cryptography is strongly dependent on the design and implementation of cryptographic algorithms [2].

A user mainly desires a cryptographic algorithm with low cost and high performance [3]. Many researches compare different cryptographic algorithms [4][5][6]. Also, various technologies such as social engineering, mathematical science, physiological signals, and biometrics have been used for the design of cryptographic algorithms [7][8].

Depending on the usage of an algorithm, different technical and non-technical requirements should be considered for its design [9]. The constituent factors of the algorithms are put into a coherent system with logical integrity to analyze and measure their interactions. In [10] different algorithms are evaluated based on some factors such as *key size* and *block size*. Also in [11] explained cryptographic standards. As cited in a research by CompTIA, it was a fast growing industry with a rate of 5 to 7 percent in the first quarter of 2018 [12]. To raise the level of information security has been a significant concern. For a desired security system, the components should be developed considering technological, organizational, process and human dimensions [13], fit to a model of excellence to ensure acceptable level of security, and ensure stability and continuity [14][15]. At the organizational level, the information security management system (ISMS) [16][17] is the only known and pervasive system of this kind. ISMS is a general system and based on the first edition of the British Standards Institute (BSI). The International Telecommunication Union (ITU) also developed an information security management system for communication networks based on the 2008 edition of ISMS [18]. Later, the International Organization for Standardization (ISO) published an information security management for communication organizations [19], particularly for telecom operators. According to the management system, the formation and realization of sustainable security for a communication network require two features, i.e., *the use of a suitable set of security controls* and *deployment based on an excellence model*. In latter management system, the proper set of security controls is at least composed of process controls and excellence for security cycles. The cycles consist of four stages of design, implementation, measurement and improvement.

At the international level, the International Telecommunication Union has provided the example of the National Cyber Security Strategy for the systematic deployment of information security for the member states [20]. The European Network and Information Security Agency (ENISA) also has recommended the deployment of national cybersecurity strategies (NSCC) for the EU member states [21]. Other types of security architecture patterns are also recommended for the realization of desired security. The most important one is the end-to-end security architecture pattern [22][23], which is based on the network architecture model. The pattern of enhancing the information security of critical infrastructures is an alternative type [24], which is based on a functional architectural model. Finally, the organizational security architecture of Sherwood Applied Business Security Architecture (SABSA) [25] is also based on organizational architectural model [24]. In [26], a generic model is provided to design cryptographic algorithms with six parameters such as goal, input, activities, output, outcomes and performance. This model ignores some significant factors like *key size*, *block size*, *round number* as well as their interactions.

2. A cybernetic cryptographic algorithm meta model

The methodology for designing a model for cryptography algorithms was cybernetic approach (CA). CA is capable to encompass a process-oriented modeling to the nature of control in man, animal and machine and therefore is widely used in a broad fields such as engineering, mechanics, biology, psychology, and management [27][28]. CA is comprehensive, hierarchical, and physically understandable by

applying a graph structure; it is capable to communicate among various components. CA is properly apt to the combinatorial nature of the cryptographic algorithms [29][30]. The cybernetic model constitutes four main parts, which are strategy/policy, main, support and control components [31]. Main Process: This type of process involves the raison d'etre of the system. In fact, by examining the cause of existence of each system, we can get to main process.

- Strategy/Policy Development: In this component, based on the expected and approved strategies and policies in the system, a functional and comparison basis can be determined and designed (e.g., reference or standard values). As a result, based on these, we can recognize and control the functionality of the system.

- Supportive Process: These processes are necessary for the fulfillment of the main processes. The support processes are classified into "hard" and "soft" ones. "Hard-support" processes are concrete and quantitatively measurable, such as the processes of development and supply of equipment, materials and infrastructure. "Soft-support" processes, such as many soft aspects, are not concrete but mainly measurable such as the development of management, organization, information and communication technologies (ICT), rules and regulation, standards, human resources, and so on.

- Process/Product Control (Feedback) Process: It is referred to the activities which help system to monitor, measure, evaluate and finally control all processes in the main and supportive process modules and correct the deviations.

The cryptographic system includes algorithms, keys and protocols [32], and the main process or the raison d'etre of a typical cryptographic algorithm, in highest level, is shown in Figure 1.

The selection of cryptographic algorithm depends on its intended services. For instance,

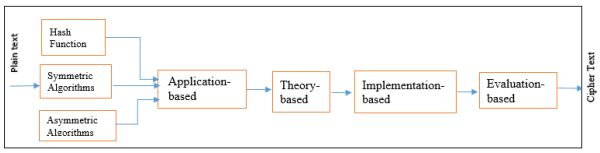


Figure 1: A typical main process of a cryptographic algorithm, in highest level

some cryptographic algorithms are better for confidentiality, but they are very weak for integration (e.g. one-time-pad). Similarly, some cryptographic algorithms are better for integration, but they do not provide proper confidentiality (e.g. ciphers of message confirmation). In designing a cryptographic algorithm, various fields of mathematical knowledge such as pseudo-random functions, Boolean functions [33], and symmetric random functions [34] are very important. There are many metrics for evaluating cryptographic algorithms, the most important of which are: key length, attack steps, attack time, rounds, algorithm strength, types, functions, complexity, speed, block size, flexibility, scalability, memory consumption, and encryption rate [35, 36, 37]. The components of the encryption algorithms are "hash function", "symmetric algorithm" and "asymmetric algorithm". Each of these components has a number of attributes that have assigned some variables to it, as shown in Figure 2.

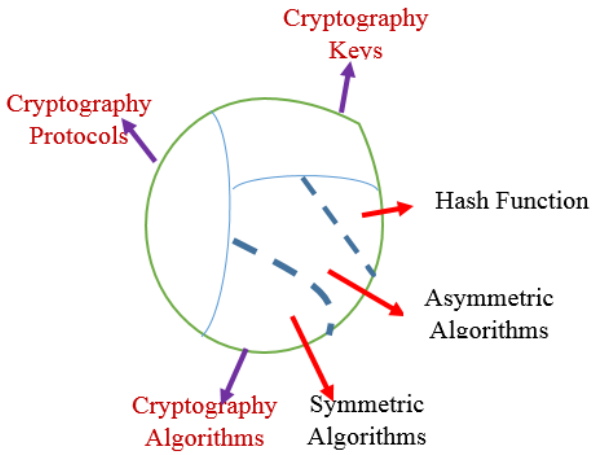


Figure 2: Cryptographic system (Level 1)

The proposed cybernetic cryptography model in the conceptual level is presented in Figure 3. The model consists of four parts:

the policy development, main, support and control processes. The main process includes cryptography algorithms. The support component is divided into two main categories, hard, soft sub-components. Soft component includes ten development sub-components as follows: the development of management, organization, human resources/education, research and development, standard, rule and regulation, financial resources, ICT, public/international relations or relations, and cultural aspects. The hard components include three sub-components namely, the development of infrastructure, equipment and materials. Finally, the control component encompasses both the controls of process and outputs as products. Also a more detailed cybernetic cryptography model is shown in Figure 4.

3. Model of influence of factors Affect the Design of Cryptographic Algorithms

To design an efficient hierarchical cryptography algorithm, the significant factors are to be chosen and grouped properly. Based on the cybernetic model, there exist 13 meta-factors (Figure 4) that interacts with 4 modules in the core process (Figure 1). The interaction and importance of these factors were determinate by a broad interviews from a group of 30 experts. Then, the factors are grouped depending upon their interaction to the modules of the core process of the cryptography algorithm.

The indices of interaction matrix are shown in Table 1. These indices are in the range of 0 to 10 in the matrix to indicate the significance of the interaction, determined by the experts.

3.1. Incidence Matrix and implementation of the model

To indicate the impact of support indices on the core processes of the cryptographic algorithms design, an incidence matrix is created for data Matrix A (Table 1). Data Matrix A consists of two sets. Set D represents the support components indices and set C represents the four stages of the cryptographic algorithms.

$$D = \{d_1, d_2, \cdots, d_{13}\}$$

Table 1: Interaction matrix of 13 support components Vs four stages of cryptographic algorithms

	Support Process	Core/Main Process Cryptography algorithms [A]	[B]	[C]	[D]	Level 1 Level 2 Level 3
soft	Cutural	5	6	5	2	
	Organization	8	7	8	8	
	Public international relation	5	4	4	7	
	Financial resources	7	6	7	6	
	Human Resource/Education	8	10	10	9	
	Research and Development	10	8	8	10	
	Rule and regulation	7	4	5	10	
	Development of management	9	7	8	7	
	ICT	10	5	8	7	
	Standard	10	3	8	10	
hard	Equipment	8	6	7	8	
	Development of infrastructure	9	5	5	7	
	Materials	7	2	5	5	

[A]:Application-based ; [B]:Theory-based
[C]:Implementation-based, [E]: Evaluation-based

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$$

Tables 2 and 3 show entities of the two sets above.

Table 2: Indicators of support components

Indicator	Support component
d_1	Cultural
d_2	Organization
d_3	International Relation (IR)
d_4	Financial
d_5	Human resource/Education (HR)
d_6	Research & Development (R& D)
d_7	Rule & Regulation (R& R)
d_8	Management
d_9	Information and Communication Technology (ICT)
d_{10}	Standard

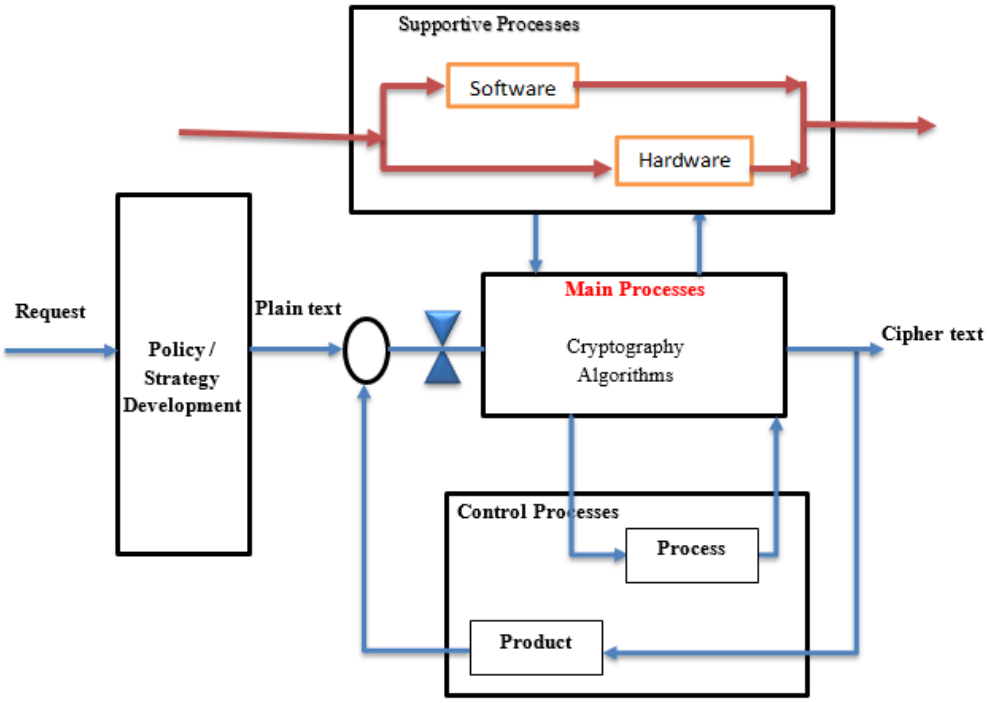


Figure 3: Proposed cybernetic cryptography model in conceptual level (Level 2)

Table 3: Indicators of four stages of cryptographic algotithms

Indicator	Stage
c_1	Use
c_2	Science
c_3	Programming Skills
c_4	Evaluation

The incidence matrix, calculated from data matrix A, indicates the relationship between the members of the two sets. The matrix indicates the existence/nonexistence of a relationship between each member of the two sets. Matrix A is transformed into an incidence matrix B with using a "α–cut parameter", by defining a one-to-one function as is presented in equation (1):

$$\lambda \text{ or } b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_{ij} \geq \alpha, \\ 0 & otherwise, \end{cases} \quad (1)$$

Where b_{ij} or α_{ij} is the entity of the ith row and the jth column in the incidence matrix (zero or one) and a_{ij} is equivalent to the given matrix A. Therefore, the entity $b_{ij} = 1$ if and only if the entity i of set C interacts with the entity j of set D. The incidence matrix calculated from matrix A for $\alpha_{\%70}$ is shown in Table 4.

By assigning different values for the α-cut parameter, different "incidence matrices" are obtained. The α-cuts intended for analysis include: $\alpha_{(\%50)} = 5$, $\alpha_{(\%60)} = 6$, $\alpha_{(\%70)} = 7$, $\alpha_{(\%80)} = 8$, $\alpha_{(\%90)} = 9$, $\alpha_{(\%100)} = 10$.

4. Analysis-Q

4.1. Geometrical representation

Multidimensional properties of the system are defined by a simplical complex set, or $KD(C, \lambda)$, such that: The entities of set "D" represent the simplexes (support indicators) σ_p (d_i) and the entities of set C are vertices (cryptographic algorithm four stages). The simplexes of this complex are geometric shapes that represent the relationships that exist in the incidence matrix.

Conventionally, the dimensions of the simplex (p) are shown as captions, and the simplex is denoted by the element shown in parentheses [38]. The simplex dimension is equal to the number of corresponding vertices minus one. In the sample, the d_i are:

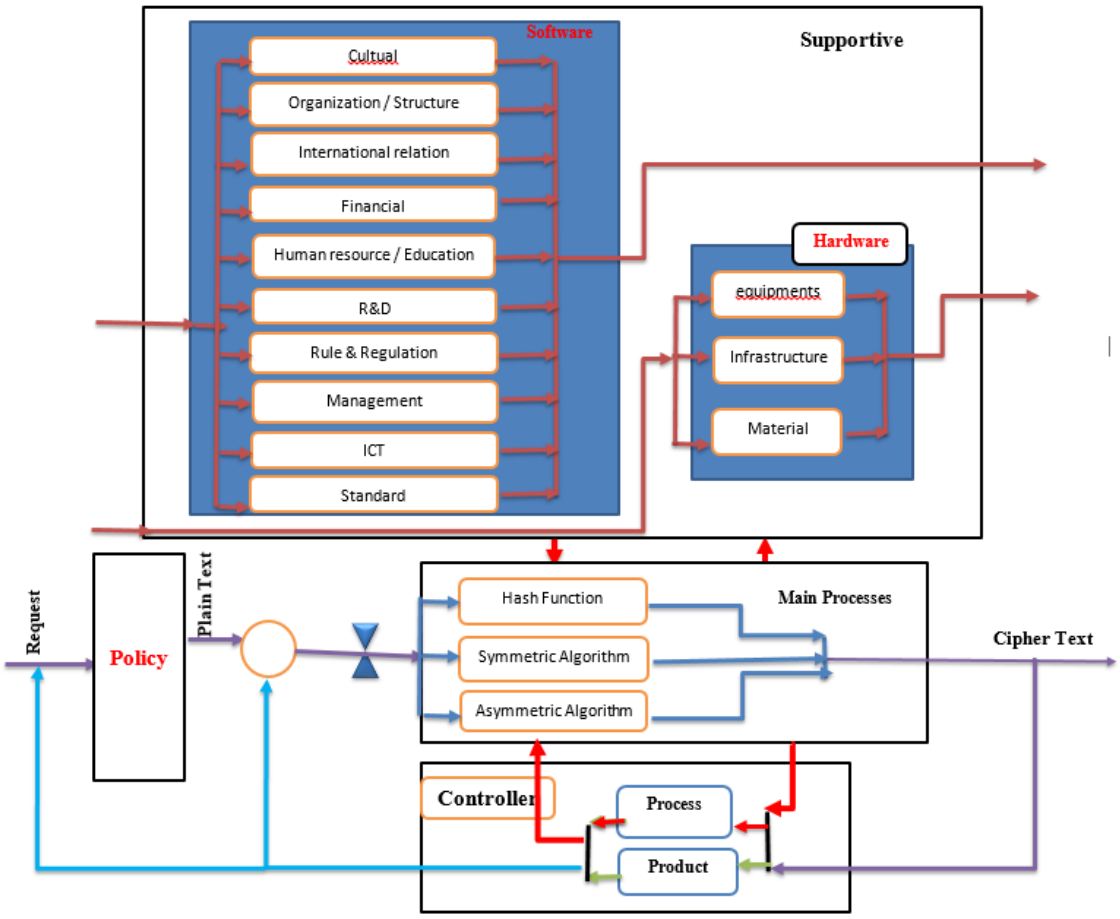


Figure 4: A detailed cybernetic cryptography model (Level 3)

$d_{(1)} = \{\}$, $d_{(2)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, $d_{(3)} = \{c_4\}$,
$d_{(4)} = \{c_1, c_3\}$, $d_{(5)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$,
$d_{(6)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, $d_{(7)} = \{c_1, c_4\}$,
$d_{(8)} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$, $d_{(9)} = \}c_1, c_3, c_4\}$,
$d_{(10)} = \{c_1, c_3, c_4\}$, $d_{(11)} = \}c_1, c_3, c_4\}$,
$d_{(12)} = \{c_1, c_4\}$, $d_{(13)} = \{c_1\}$. Also the $\sigma_p(d_i)$ simplexes are:

$\sigma_1(d_7)$, $\sigma_3(d_6)$, $\sigma_3(d_5)$, $\sigma_1(d_4)$, $\sigma_0(d_3)$, $\sigma_3(d_2)$, $\sigma_{(d_{-1})}(d_1)$, $\sigma_0(d_{13})$, $\sigma_1(d_{12})$, $\sigma_2(d_{11})$, $\sigma_2(d_{10})$, $\sigma_2(d_9)$, $\sigma_3(d_8)$. Therefore, the maximum complex dimension is 3.

4.2. *Computation of Dimensions and q-connectivity*

The q-connectivity between a subset is represented by the weakest relationship (The smallest common face) between the two consecutive di in the chain d1 to dn is expressed. The simplex relation that described by q-connectivity, is an equivalence relation that is a symmetric, reflective, and transitive relation. The q-Connectivity between the two consecutive d_i is as follows:

$$\begin{aligned}
\sigma_{(-1)}(d_1), \sigma_3(d_2) &\rightarrow -1 \quad \sigma_3(d_2), \sigma_0(d_3) \rightarrow 0 \\
\sigma_1(d_4), \sigma_3(d_5) &\rightarrow 1 \quad \sigma_3(d_5), \sigma_3(d_6) \rightarrow 3 \\
\sigma_1(d_7), \sigma_3(d_8) &\rightarrow 1 \quad \sigma_3(d_8), \sigma_2(d_9) \rightarrow 2 \\
\sigma_2(d_{10}), \sigma_2(d_{11}) &\rightarrow 2 \quad \sigma_3(d_{11}), \sigma_1(d_{12}) \rightarrow 1 \\
\sigma_0(d_3), \sigma_1(d_4) &\rightarrow -1 \quad \sigma_3(d_6), \sigma_1(d_7) \rightarrow 1 \\
\sigma_2(d_9), \sigma_2(d_{10}) &\rightarrow 2 \quad \sigma_1(d_{12}), \sigma_0(d_{13}) \rightarrow 0
\end{aligned}$$

The maximum connection dimension is 3.

4.3. *Computation of structure vectors*

For each dimension q of the complex set K, we define integer Qq as the number of distinct equivalence classes, such that each equivalence class is composed of q-connectivity simplexes.

Table 4: Incidence matrix with $\alpha_{\%70} = 7$

	Support Process	Core/Main Process Cryptography algorithms [A]	[B]	[C]	[D]	Level 1 Level 2 Level 3
soft	Cutural	0	0	0	0	
	Organization	1	1	1	1	
	Public international relation	0	0	0	1	
	Financial resources	1	0	1	0	
	Human Resource/Education	1	1	1	1	
	Research and Development	1	1	1	1	
	Rule and regulation	1	0	0	1	
	Development of management	1	1	1	1	
	ICT	1	0	1	1	
	Standard	1	0	1	1	
hard	Equipment	1	0	1	1	
	Development of infrastructure	1	0	0	1	
	Materials	1	0	0	0	

[A]:Application-based ; [B]:Theory-based
[C]:Implementation-based, [E]: Evaluation-based

This Qq vector is a simplification basis that came into being for eliminating redundant effects in the set of equivalence simplexes.

The first structure vector, Q is:

$Q = (Q_{dim3}, Q_{dim2}, Q_{dim1}, Q_{dim0})$

$Q = (4, 3, 3, 2)$

The second structure vector, P is:

$P = (P_{dim3}, P_{dim2}, P_{dim1}, P_{dim0})$

$P = (4, 7, 10, 12)$

Pq represents the number of simplexes larger than or equal to q in the set K. Where, P denotes the number of repetitions of the simplexes connectivity (support indicators) to vertices (cryptographic algorithm four stages). The larger the P values for the higher dimensions, the greater the connection. In contrast, the Q vector represents the extent of the connections between the simplexes connected (support indicators) by a set of vertices (cryptographic algorithm four stages) [39].

4.4. Obstruction or inflexibility vector

Obstruction vector (Q^*) that specifies the information flow limitation during the complex. (Q^*) means whether the members of the simplex (each of the support indicators) in any of the equivalence classes in the k-dimension can interact directly or indirectly at the k-level (have effect on each other). The number of barriers to these interactions in the k-dimension is the number of "gaps" between the equivalence categories. Therefore, (Q^*) is created by subtracting a vector I from the structure vector, which includes all categories. That is mean:

$Q^* = [4, 3, 3, 2,] - [1, 1, 1, 1,]$

$Q^* = [3, 2, 2, 1]$

The value of ${Q^*}_K$ represents the number of structural constraints for the simplex interactions in the k dimension. Depending on the type of problem, high or low values of Q* elements may be preferred. For example, we prefer to have high obstruction between diagnostic values so that they are easily recognizable.

Due to the obtained values, it can be concluded that the effective indicators in designing the cryptographic algorithms are varied and sometimes independent. The obstruction vector and the equivalence classes at each level q with the cutoff parameter $\alpha = 7$ are shown in Table 5.

Table 5: Structure vector, obstruction vector and equivalence classes at each level q with $\alpha = 7$

q	Q	P	Q^*	equivalence classes
3	4	4	3	$\{d_2\}, \{d_5\}, \{d_6\}, \{d_8\}$
2	3	7	2	$\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_9\}$, $\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_{10}\}$, $\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_{11}\}$
1	3	10	2	$\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_4\}$, $\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_7\}$, $\{d_2, d_5, d_6, d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_{12}\}$
0	2	12	1	$\{d_2, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_{12}, d_3\}$, $\{d_2, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_{12}, d_{13}\}$

The high value of this vector indicates system inflexibility [40]. Instead, its low value indicates high flexibility for the system. In fact, this vector is an appropriate index for the qualitative evaluation of system data in mathematics language. This flexibility or lack thereof can be attributed to the behavior of any of the q-levels. It is therefore necessary that all q-levels in the inflexibility vector

be evaluated individually to obtain the degree of flexibility of each element. The high amount of flexible vector indicates that the system is more stable and less susceptible to oscillations caused by external stimuli [38].

4.5. Computation of Eccentricity

While the structure vectors and the obstruction vectors describe the overall structural properties; the eccentricity indicates the degree of integration of a particular simplex throughout the complex. Conventional measurement of eccentricity for a simplex is the method defined in [41], called ecc according to equation (2). But Chin et al. in [42] offer another way of measuring eccentricity called ecc'according to equation (3):

$$ecc(\sigma) = \frac{\hat{q} - q^*}{q^* + 1} \tag{2}$$

$$ecc'(\sigma) = \frac{2\sum q_i/\sigma_i}{q_{max}\,(q_{max}+1)} \tag{3}$$

where in: is the simplex of σ. q^* is the largest common dimension of the simplex σ with other simplexes (the relation value) in an equivalence class. q_i is any q-level of σ that exists. σ_i The number of elements in the σ_i equivalence classes at the level of q_i. q_{max} is the maximum q of the complex set level.

Difference $(\hat{q} - q^*)$ is a criterion for determining the joint range of σ with another simplex which it has the most common vertices with it. Therefore, ecc depends only on one simplex over the others, while ecc' also depends on all other simplexes. In addition, the value of ecc is in the range $[0, \infty]$ and ecc' is in the range $[0, 1]$.

For each simplexes of set (support indices), the degree of eccentricity can be defined in two ways, according to the conventional method proposed by Casti ($ecc(\sigma)$) and based on the results of the Q-analysis performed for the data matrix A (Table 1), the eccentricity for all parameters equals zero. As a result, this method is not a suitable method for measuring the degree of eccentricity in the indices communication. Therefore, we use the Chinese method ($ecc'(\sigma)$) for this purpose. The results can be seen in Table 6.

Table 6: Eccentricity of Cryptographic algorithms Parameters in Data Matrix A for cutoff parameter $\sigma_{\%70}$

σ	q_i	$\sum q_i/\sigma_i$	q_{max}	$ecc'(\sigma)$
d_2, d_5, d_6, d_8	{3,2,1}	3,64	3	0,61
d_9, d_{10}, d_{11}	{2,1}	0,64	3	0,11
d_4, d_7, d_{12}	{1}	0,14	3	0,02

The lower eccentricities, the simplex corresponds better to the overall complex structure.

4.6. Complexity

The results of the Q-analysis can also be used to describe the complexity of the system structure. The complexity criterion, proposed in [43], is presented in equation (4):

$$\Psi(K) = 2\left[\sum_{k=0}^{dimK} \frac{(k+1)Q_k}{(dimK+1)(dimK+2)}\right] \tag{4}$$

So Q_k is part of k of the vector structure of Q. The scale satisfies the principles outlined above. Explicitly states that both the dimension and the number of equivalence classes factors are related to the complexity of the structure. For $\alpha - cut = 7$:

$Q = (Q_{dim3}, Q_{dim2}, Q_{dim1}, Q_{dim0})$

$Q = (4, 3, 3, 2)$

$$\Psi(K) = 2\left[\frac{(4+6+9+8)}{(4\cdot 5)}\right] = 2{,}7$$

It is obviously that due to the variety of supporting indexes that are effective in designing cryptographic algorithms, there is a relatively high degree of complexity between the indexes, which number 2,7 confirms this.

The results of implementing the Q-Analysis model using a C++ code, for $\alpha_{\%70} = 7$, are shown in Figure 5.

5. Ranking of the support components

The result of applying Q-analysis on the "interaction matrix" cited in Figure 5, is shown in Table 7. The strength of the connectivity of the factors in a group is determined by $\alpha - cut$, shown in percentage. Thus, the support components are

```
-1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1  -1
    3   0   1   3   3   1   3   2   2   2   1   0
        0  -1   0   0   0   0   0   0   0   0  -1
            1   1   1   0   1   1   1   1   0   0
                3   3   1   3   2   2   2   1   0
                    3   1   3   2   2   2   1   0
                        1   1   1   1   1   1   0
                            3   2   2   2   1   0
                                2   2   2   1   0
                                    2   2   1   0
                                        2   1   0
                                            1   0
                                                0
```

```
q     Q       SETS
---   ---     ------------------------------
3     1       {X2,X5,X6,X8}
2     1       {X2,X5,X6,X8,X9,X10,X11}
1     1       {X2,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12}
0     1       {X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,X13}
```

Figure 5: Results of implementing the Q-Analysis model using a C++ code, for $\alpha_{\%70} = 7$

grouped in 5 levels or ranks. Each level indicates the priority and importance of the group in the process of developing a cryptographic algorithm.

For a proper resource allocation, the components in the higher level of the pyramid (Figure 6) have higher priority.

Table 7: Ranking of support components using Q-Analysis

Connectivity of the support components for developing cryptographic algorithms ($q = 0$) (no connection: $\alpha = 0\%$, full connection: $\alpha = 100\%$)	
Human resources, R&D, Rules and regulations, ICT, Standards	$\alpha_{(\%100)} = 10$
Development of Management, Infrastructure	$\alpha_{(\%90)} = 9$
Organization, Equipment	$\alpha_{(\%80)} = 8$
Public and international relations, financial resources, Material	$\alpha_{(\%70)} = 7$
Culture	$\alpha_{(\%60)} = 6$
All components	$\alpha_{(\%60)} = 5$

The results about the priority and importance of the group in the process of developing a cryptographic algorithm were compared to the Global Cybersecurity Index (GCI) reports of 2015, 2017 and 2018 issued by International

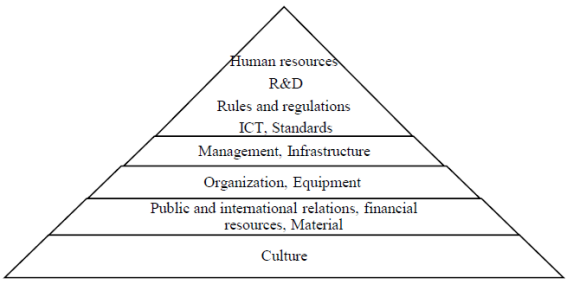


Figure 6: The pyramid of ranking of support components using Q-Analysis

Telecommunication Union (ITU) [44][45][43]. results of the cybernetic model and Q-analysis to group and rank the support components is determined. The results are compared to the Global Cybersecurity Index (GCI) reports of 2015, 2017 and 2018 issued by International Telecommunication Union (ITU) [44][45][43]. The focus was on cryptography. The reports focus on five indices that are "legal, organization, technical, capacity building, and cooperation. The relevant sub-indices are as follows:

- Legal: Cybercrime legislation, Cybersecurity Regulation, Containment/curbing of spam legislation.
- Technical: National/ Government/ Sectorial CERT/CIRT/CSIRT, Standard, technical mechanisms.
- Organization: Strategy, Responsible Agency, Cybersecurity Metrics.
- Capacity Building: Public Awareness, Cybersecurity Standards and Certification for professionals, Cybersecurity Professional Training Courses, National Education Programs and Academic Curriculums, Cybersecurity Research & Development Programs, Incentive Mechanisms.
- Cooperation: Bilateral Agreements, Multilateral Agreements, Public-private partnership, Interagency/intra-agency partnerships.

Table 8: GCI most committed countries globally in 2015 (normalized score)[44]

Country	Legal	Technical	Organizational	Capacity Building	Cooperation	Index	Global Rank
U.S.A	1	0,8333	0,875	1,000	0,5	0,8235	1
Canada	0,75	1	0,875	0,875	0,5	0,7941	2
Australia *	0,75	0,6667	0,875	0,875	0,625	0,7647	3
Malaysia *	0,75	0,8333	1	0,625	0,625	0,7647	3
Oman *	0,75	0,6667	1	0,75	0,625	0,7647	3
Norway *	1	0,6667	0,75	0,875	0,5	0,7353	4
New Zealand *	1	0,8333	0,875	0,625	0,5	0,7353	4
Brazil *	0,75	0,6667	0,875	0,75	0,5	0,7059	5
Estonia *	1	0,6667	1	0,5	0,5	0,7059	5
Germany *	1	1	0,625	0,625	0,5	0,7059	5
India *	1	0,6667	0,755	0,875	0,375	0,7059	5
Japan *	1	0,667	0,75	0,625	0,625	0,7059	5
Republic of Korea*	1	0,6667	0,875	0,625	0,5	0,7059	5
United Kingdom *	1	0,6667	0,75	0,75	0,5	0,7059	5
Average	0,9107	0,75	0,8482	0,7411	0,5268		

*:Based on secondary data

Table 9: GCI most committed countries globally in 2017 (normalized score)[45]

Country	GCI Score	Legal	Technical	Organizational	Capacity Building	Cooperation
Singapore	0,92	0,95	0,96	0,88	0,97	0,87
United States	0,91	1	0,96	0,92	1	0,73
Malaysia	0,89	0,87	0,96	0,77	1	0,87
Oman	0,87	0,98	0,82	0,85	0,95	0,75
Estonia	0,84	0,99	0,82	0,85	0,94	0,64
Mauritius	0,82	0,85	0,96	0,74	0,91	0,7
Australia	0,82	0,94	0,96	0,86	0,94	0,44
Georgia	0,81	0,91	0,77	0,82	0,9	0,7
France	0,81	0,94	0,96	0,6	1	0,61
Canada	0,81	0,94	0,93	0,71	0,82	0,7
Average		0,934	0,91	0,8	0,943	0,701

Table 10: GCI most committed countries globally in 2018 (normalized score)[43]

Rank	Member States	GCI Score	Legal	Technical	Organizational	Capacity Building	Cooperation
1	United Kingdom	0,931	0,2	0,191	0,2	0,189	0,151
2	U.S.A	0,926	0,2	0,184	0,2	0,191	0,151
3	France	0,918	0,2	0,193	0,2	0,186	0,139
4	Lithuania	0,908	0,2	0,168	0,2	0,185	0,155
5	Estonia	0,905	0,2	0,195	0,186	0,17	0,153
6	Singapore	0,898	0,2	0,186	0,192	0,195	0,125
7	Spain	0,898	0,2	0,18	0,2	0,168	0,148
8	Malaysia	0,893	0,179	0,196	0,2	0,198	0,12
9	Norway	0,892	0,191	0,196	0,177	0,185	0,143
10	Canada	0,892	0,195	0,189	0,2	0,172	0,137
	Average		0,1965	0,1878	0,1955	0,1839	0,1422

The indices of Cybersecurity for the highest ranked countries, issued in GCI 2015, 1017, and 2018 are presented in Tables 8, 9 and 10.

Based on the indices presented in Tables 8, 9 and 10 the relevant sub-indices, GCI reports indicate that *regulation*, *standard*, *R&D*, *education*, and *management* have the highest priority in developing cybersecurity or cryptographic algorithms.

6. Conclusion

The cybernetic meta-model of encryption has the following four components: *policy and strategy*, *main processes*, *supportive processes*, *control processes*. The *main processes* has four processes. Also, the *supportive processes* encompasses 13 processes, grouped in *hard* and *soft* ones. These processes have four *development stages* which determine *type of applications*, proper *theoretical basis*, *implementation*, and *evaluation*.

The interactions of *main* and *supportive* processes shape the structure of the encryption system. These interactions result in a complex graph. A proper method to tackle such a complex entity is Q-analysis, which groups and ranks the components due to their interactions. Each interaction is also evaluated, based on its four *development stages*. A questionnaire is developed to evaluate the interactions. Then, a group of 30 ICT evaluated the interactions by assigning scores from 0 to 10, which indicate significance of an interaction.

The outputs of Q-analysis indicate that the most significant components, or the group with the highest priority, for developing an encryption system consists *Human resources*, *R&D*, *Rules and regulations*, *ICT*, and *Standards* components. These result is accordance with the GCI 2015, GCI 2017 and GCI 2018 reports issued by ITU.

7. References

[1] W. Liu, B. Ying, H. Yang, and H. Wang, "Accurate modeling for predicting cryptography overheads on wireless sensor nodes," in *Advanced Communication Technology. ICACT 2009. 11th International Conference*, vol. 2, Phoenix Park, 2009, pp. 997–1001.

[2] D. Nilesh and M. Nagle, "The new cryptography algorithm with high throughput," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

[3] P. Patil, P. Narayankar, D. G. Narayan, and S. M. Meena, "A Comprehensive Evaluation of Cryptographic Algorithms: DES, 3DES, AES, RSA and Blowfish," *Procedia Computer Science*, vol. 78, pp. 617–624, Dec. 2016.

[4] M. Rashid, M. Imran, and A. Jafri, "Comparative analysis of flexible cryptographic implementations," in *2016 11th International Symposium on Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)*, Tallinn, 2016, pp. 1–6.

[5] Y. Acar, M. Backes, S. Fahl, S. Garfinkel, D. Kim, M. Mazurek, and C. Stransky, "Comparing the Usability of Cryptographic APIs," in *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, San Jose, CA, 2017, pp. 154–171.

[6] A. Poojari and H. Nagesh, *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer, 2019, vol. 755, ch. A Comparative Analysis of Symmetric Lightweight Block Ciphers, pp. 705–711.

[7] D. Karaoğlan Altop, A. Levi, and V. Tuzcu, "Deriving cryptographic keys from physiological signals," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 39, pp. 65–79, Aug. 2016.

[8] O. Uzunkol and M. S. Kiraz, "Still wrong use of pairings in cryptography," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 333, pp. 467–479, Sep. 2018.

[9] S. Feizi, A. Ahmadi, and A. Nemati, "A hardware implementation of Simon cryptography algorithm," in *2014 4th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, Mashhad, Iran, 2014, pp. 245–250.

[10] A. Gupta and N. Walia, "Cryptography Algorithms: A Review," *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 2, no. 2, pp. 1667–1672, 2014.

[11] National Institute of Standards and Technology (NIST), "NIST Cryptographic Standards and Guidelines Development Process," U.S. Department of Commerce, United States of America, Technical report, 2016.

[12] CompTIA Information Technology, "IT INDUSTRY OUTLOOK 2018," CompTIA, Research report, 2018.

[13] P. Pawlak and P.-N. Barmpaliou, "Politics of cybersecurity capacity building: conundrum and opportunity," *Journal of Cyber Policy* , vol. 2, no. 1, p. 123–144, 2017.

[14] The Global Cyber Security Capacity Centre, "Cyber Security Capability Maturity Model (CMM) – V1.2," Oxford Martin School, University of Oxford, United Kingdom, Technical report, 2014.

[15] J. Cristopher, F. Muneer, and J. Fry, "Cyber Security Capability Maturity Model (C2M2)," U.S. Department of Homeland Security (DHS), United States of America, Technical report, 2014.

[16] ISO/IEC JTC1, *ISO/IEC 27002: Information Technology- security techniques-information security management systems –code of practice for information security controls*, International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC), 2013.

[17] ISO/IEC JTC1, *ISO/IEC 27001: Information Technology- security techniques-information security management systems–Requarments*, International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC), 2013.

[18] ISO/IEC JTC1, *ISO/IEC 27011: Information Technology-security techniques-information security management guidelines for telecommunications organizations based on ISO/IEC 27002*, International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC), 2016.

[19] ISO/IEC JTC1, *ISO/IEC 27005: Information Technology-security techniques-information security risk management*, International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC), 2011.

[20] F. Wamala, "The ITU National Cybersecurity Strategy Guide," International Telecommunication Union (ITU), Geneve, Switzerland, Technical report, 2001.

[21] N. Falessi, R. Gavrila, M. Klejnstrup, and K. Moulinos, "National Cybersecurity Strategies: Practical Guide on Development and Execution," European Network and Information Security Agency (ENISA), Technical report, Dec. 2012.

[22] International Telecomunication Union, *Recommendation X.805: Security Architecture for system providing end-to-end Communications*, ITU, Oct. 2003.

[23] I. T. Union, *Security in Telecommunications and Information Technology Security in telecommunications and Information Technology*, ITU, Sep. 2015.

[24] K. Stine, K. Quill, and G. Witte, *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity*, NIST, Feb. 2014.

[25] J. Sherwood, C. Andrew, and L. David, "Enterprise Security Architecture," SABSA, Technical report, 2016.

[26] I. Damaj and S. Kasbah, "An analysis framework for hardware and software implementations with applications from cryptography," *Computer and Electrical Engineering*, vol. 69, pp. 572–584, Jul. 2018.

[27] W. Norbert, *Cybernetics: or the Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1948.

[28] D. Novikov, *Cybernetics: From Past to Future*. Springer, 2016.

[29] R. Ramazani, "The Current Challenges of Universities and the National Science Development System," *Journal of Research and Planning in Higher Educatio*, vol. 8, no. 3, pp. 37–62, 2002.

[30] R. Ramazani, "Feasibility study of network on science and technology parks Inter-Islamic Network On Science & Technology Parks," in *Comstech*, 2010.

[31] A. Mirzadeh Phirouzabadi, M. Moattar Husseini, and M. Arasti, "General cybernetic model for innovation network Management," in *International Conference on Leadership, Technology and Innovation Managment*, Istanbul, Turkey, 2011.

[32] B. Schneier, *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[33] S. Picek, D. Jakobovic, J. Miller, L. Batina, and M. Čupić, "Cryptographic Boolean Functions: One Output, Many Design Criteria," *Applied Soft Computing*, vol. 40, pp. 635–653, 2015.

[34] R. Saha and G. Geetha, "Symmetric random function generator (SRFG): A novel cryptographic primitive for designing fast and robust algorithms," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 104, pp. 371–377, 2017.

[35] M. A. Hossain, M. Hossai, M. Uddin, and S. Imtiaz, "Performance Analysis of Different Cryptography Algorithms," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 659–665, 2016.

[36] N. Jorstad, "Cryptographic Algorithm Metrics," Institute for Defense Analyses Science and Technology Division, Technical report, 1997.

[37] M. Ebrahim, S. Kham, and U. Khalid, "Symmetric algorithm survey: A comparative analysis," *International Journal of Computer Applications* , vol. 61, no. 20, pp. 12–19, 2013.

[38] J. Johnson, "Some structures and notation of Q-analysis," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 8, pp. 73–86, 1981.

[39] L. Duckstein, "Evaluation of the Performance of a Distribution System by Q-Analysis," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 13, pp. 173–185, 1983.

[40] R. Atkin, *Mathematical Structure in Human Affairs*. Heinemann Educational Publishers, 1971.

[41] J. L. Casti, *Connectivity, Complexity, and Catastrophe in Large-Scale Systems*. J. Wiley Chichester [Eng.] ; New York, 1979.

[42] M. Heinonen, A. Lampi, L. Hyvönen, and D. Homer, "Dietary sources of conjugated dienoic isomers of linoleic acid, a newly recognized class of anticarcinogens," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 5, no. 3, pp. 198–208, 1992.

[43] International Telecommunication Union, "Global Cybersecurity Index (GCI) 2018," ITU, Technical report, 2018.

[44] International Telecommunication Union, "Global Cybersecurity Index &Cyberwellness Profiles," ITU, Technical report, 2015.

[45] International Telecommunication Union, "Global Cybersecurity Index (GCI) 2017," ITU, Technical report, 2017.

Vibration assessment of transmission bearings of a mini Baja SAE prototype

Enrique Flores *,[a], Andrés Albornoz[b], Erwin López[b], Jorge Romero[c]

[a]*Centro de Investigaciones en Mecánica (CIMEC), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*
[b]*Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*
[c]*Centro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- In the present work, a non-invasive assessment of vibrations to the bearings of the transmission system of the mini Baja SAE UC 2004 prototype is carried out, in which possible defects are analyzed. The study carried out included the following stages: location and specification of each bearing used in the transmission system; measurement and data collection; obtention the failure frequencies for each bearing of the transmission system and study of the data obtained. The main results obtained are that all the bearings of the transmission system presented the possibility of failure for the two speeds of rotation of the transmission shaft defined for this study, the most recurrent possibility failure were defects in the outer race, and the least recurring were defects in the bearing cage; increased detected failure possibilities for one of the tested spin speeds. Additionally, it was possible to establish, from the illustrated vibration diagnosis chart created by the Charlotte analytical group, the possible cause of failure for most of the bearings studied. From what was obtained, it is concluded that the possible detection of failures in the bearings studied is sensitive to the speed of the transmission system for which the measurements are made, and that although an illustrated vibration diagnosis chart created by the analytical group of Charlotte allows the determination of possible causes of bearing failure, alternative methods to this are required for such detection.

Keywords: vibrations; bearings; non invasive assesment.

Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE

Resumen.- En el presente trabajo se realiza una evaluación no invasiva de vibraciones a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo mini Baja SAE UC 2004 en el que se analizan los posibles defectos existentes. El estudio realizado comprendió las siguientes etapas: ubicación y especificación de cada rodamiento utilizado en el sistema de transmisión; medición y obtención de datos; obtención de las frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión y estudio de los datos obtenidos. Como principales resultados obtenidos se tienen que todos los rodamientos del sistema de transmisión presentaron posibilidad de falla para las dos velocidades de giro del eje de transmisión definidas para este estudio, la posibilidad de falla más recurrente fueron los defectos en la pista externa, y la menos recurrente fueron los defectos en la jaula de los rodamientos; posibilidades de falla detectadas más acentuadas para una de las velocidades de giro ensayadas. Adicionalmente se pudo establecer, a partir de la carta ilustrada de diagnóstico de vibración creada por el grupo analítico de Charlotte, la posible causa de falla para la mayoría de los rodamientos estudiados. De lo obtenido se concluye que la posible detección de fallas en los rodamientos estudiados es sensible a la velocidad de giro del sistema de transmisión para la cual se hacen las mediciones, y que si bien la carta ilustrada de diagnóstico de vibración creada por el grupo analítico de Charlotte permite la determinación de posibles causas de falla en rodamientos, se requieren métodos alternativos a este para dicha detección.

Palabras clave: vibraciones; rodamientos; evaluación no invasiva.

Recibido: 21 de febrero, 2020.
Aceptado: 03 de abril, 2020.

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*evflores@uc.edu.ve (E. Flores)

1. Introducción

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas [1]. En general, las industrias dentro de sus

programas de mantenimiento predictivo utilizan el monitoreo y análisis de las vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de las máquinas y en particular de sus elementos más críticos y de esta manera poder prevenir fallas catastróficas [2].

El análisis de vibraciones permite diagnosticar futuras fallas antes de que se originen, consiguiendo anticiparse a la falla al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en condiciones normales de operación, permitiendo establecer un criterio técnico y argumentando para determinar si dicho elemento puede reemplazarse o no; así el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza, extendiendo además la productividad del sistema operativo [3].

En un plano generalizado, las vibraciones se encuentran de manera principal en todas las máquinas, esto depende de ciertas máquinas en unas más o menos de acuerdo a factores conocidos; estos son directamente proporcionales al ruido que denotan el normal funcionamiento de una parte del sistema de transmisión [4].

Desde el punto de vista global y analizando el contexto mundial los sistemas automotrices son de gran importancia para el desarrollo de las industrias de todo el mundo, por ende, es necesario realizar un análisis exhaustivo en el funcionamiento del motor. Un problema que se ha notado en el transcurso de los años es el deterioro de las partes internas y externas del motor por casos particulares y desgaste de los mismos, un factor que se ha notado indispensable de analizar son las alteraciones ocasionadas por las vibraciones que generan [5].

En este mismo orden de ideas, dentro del mantenimiento predictivo se presta especial interés a las fallas en rodamientos, debido a su alto costo y al interés de aprovechar la mayor parte de su vida útil. La falla de un rodamiento es una de las principales causas de daños en la maquinaria rotativa. Estas fallas pueden ser catastróficas y pueden ocasionar tiempos de inactividad costosos [6].

Por ser un apoyo y soportar varios tipos de cargas transmitidas por un sistema, los rodamientos con regularidad presentan diversos tipos de fallas internas, se encuentren en un eje o no. Por ende, es importante que estos sean evaluados antes de su montaje en un sistema y durante su funcionamiento en él. Los rodamientos presentes en el sistema de transmisión de los diversos prototipos Baja SAE UC, han presentado fallas a lo largo de su participación en competencias y eventos internacionales, repercutiendo directamente en los resultados de las ya mencionadas competencias por parte del equipo de estudiantes de la Universidad de Carabobo.

La forma convencional de análisis y diagnóstico de falla en los rodamientos se ha basado en el empleo de registros de señales de vibración, que juegan en la actualidad un papel importante en el mantenimiento predictivo para analizar su comportamiento [7]. Estas señales se analizan mediante diversas técnicas entre las cuales pueden indicarse el análisis espectral, el análisis de la forma de onda, el análisis de fase, el análisis de órbitas, el análisis de coherencia, entre otras [2]; reportándose investigaciones donde se proponen metodologías alternativas [8] y donde se muestran la construcción de bancos de ensayo para la simulación de condiciones reales de carga a las cuales estaría sometido un rodamiento en particular a fin de obtener patrones de vibración que identifiquen los fallos de dicho rodamiento [9].

A pesar de las rigurosas pruebas a las que son sometidos durante las competencias, los rodamientos de la transmisión del vehículo prototipo mini Baja SAE UC no han sido evaluados con estudios no invasivos como lo es un análisis de falla por vibraciones. El conocimiento del estado de todas sus piezas no solo engloba factores económicos, a diferencia de la mayoría de la maquinaria en una planta de producción en las que son aplicados comúnmente estos análisis, sino que también podría evitar que un mal funcionamiento represente un riesgo de accidente que comprometa la seguridad integral del piloto e incluso a los espectadores, es necesario mantener bajo control el estado del rodamiento y del mismo sistema de transmisión para evitar fallas durante la competencia. Por este motivo, se realizó un estudio no invasivo de vibraciones a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo mini Baja

SAE UC 2004 en el que se analizaron los posibles defectos existentes [10], lo que podría contribuir a plantear soluciones que ayuden a mitigar los riesgos presentes.

2. Fundamentación

Las frecuencias que generan los rodamientos cuando los elementos rodantes pasan sobre una anomalía de superficie en el mismo elemento rodante o en la pista de rodadura se denominan frecuencias de falla fundamentales. Estas frecuencias son una función de la geometría del rodamiento y de la velocidad relativa entre las dos pistas de rodadura [11]. Por ejemplo, BPFO o la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento es físicamente el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Su valor viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (1):

$$BPFO = 0,5Nn\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)cos\theta\right] \quad (1)$$

Donde:

N: es la velocidad de giro [rev/s]
D: es el diámetro medio del rodamiento [in]
d: es el diámetro de las bolas o rodillos [in]
n: es el número de bolas o rodillos [adimensional]
θ: es el ángulo de contacto en el rodamiento [rad].

BPFI o la frecuencia de deterioro de la pista interior de un rodamiento, es físicamente el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (2):

$$BPFI = 0,5Nn\left[1 + \left(\frac{d}{D}\right)cos\theta\right] \quad (2)$$

BSF o la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes, es desde el punto de vista físico el número de giros que realiza un elemento rodante cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (3):

$$BSF = 0,5N\left(\frac{D}{d}\right)\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2(cos\theta)^2\right] \quad (3)$$

FTF o la frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula de un rodamiento, se define físicamente como el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (4):

$$FTF = 0,5N\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)cos\theta\right] \quad (4)$$

La Velocidad Como Amplitud de Vibración es un parámetro que permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, entre otros [12]. Generalmente se mide en pulgadas sobre segundo (sistema inglés), o en algunos casos en milímetros sobre segundo (sistema internacional). La convención es usar el valor eficaz o valor RMS. Acorde con la Norma ISO 10816 [13], el valor RMS de la velocidad como amplitud de vibración denotado por v_{rms} se determina a través de la ecuación (5):

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{v_{max}^2 + v_{min}^2}{2}} \quad (5)$$

Donde:

v_{max}: es la máxima amplitud de velocidad en el espectro de vibraciones respecto a la velocidad [in/s].
v_{min}: es la mínima amplitud de velocidad en el espectro de vibraciones respecto a la velocidad [in/s].

Una representación gráfica de un espectro de vibraciones respecto a la velocidad se muestra en la Figura 1.

La severidad de vibración es un indicador de la gravedad que puede tener un defecto. La amplitud de la vibración expresa la gravedad del problema, pero es difícil establecer valores límites de la

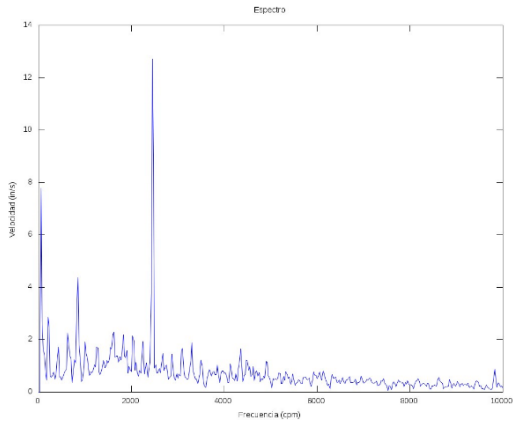


Figura 1: Espectro de vibración vista en amplitud velocidad. cpm: Ciclos Por Minuto

vibración que detecten un fallo. La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina [14].

La Figura 2 extraída de la norma ISO 10816 [13], muestra los distintos niveles de severidad en base a los valores de la media cuadrática de la velocidad. Donde el color verde representa una máquina nueva o reacondicionada, el amarillo una máquina que puede operar indefinidamente, el naranja una máquina que no debería operar por tiempo prolongado y por último el color rojo son vibraciones que provocan daño a la máquina y equipos o elementos asociados.

								Valor RMS de Velocidades	
								11	0.43
								7.1	0.28
								4.5	0.18
								3.5	0.14
								2.8	0.11
								2.3	0.09
								1.4	0.06
								0.71	0.03
								mm/s	in/s
rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	Fundación	
Bombas Mayores a 15 kW Radial, Axial, Flujo Mixto				Máquinas Medias 15kW<P<300 kW		Grandes Máquinas 300 kW <P<50MW		Tipo de Máquina	
Clase IV		Clase III		Clase II		Clase I		Grupos	

Figura 2: Severidad según el tipo de maquinaria [13]

Peakvue (valor pico) es una técnica de análisis para señales generadas a altas frecuencias, diseñada con el objetivo de estudiar elementos cuyas fallas se presentan a altas frecuencias y baja amplitud, pero solo en una etapa incipiente del defecto, ya que cuando esta perdura en el tiempo es cuando incrementa las amplitudes y aparecen las frecuencias características de fallas de los rodamientos. Por ende, la energía vibratoria aumenta a niveles considerables y la falla ya es detectable con un aspecto de aceleración y en un ancho de banda adecuado. *Peakvue* centraliza su análisis a frecuencias altas donde se está generando la onda de esfuerzo, principalmente debido a contacto metal-metal, y toma como dato el valor pico o *peak* de los impactos generados en un pequeño periodo de tiempo para luego tomar en el espectro la frecuencia de repetición de dichos impactos [15]. La Figura 3 muestra los valores pico en distintos intervalos de tiempo en un espectro.

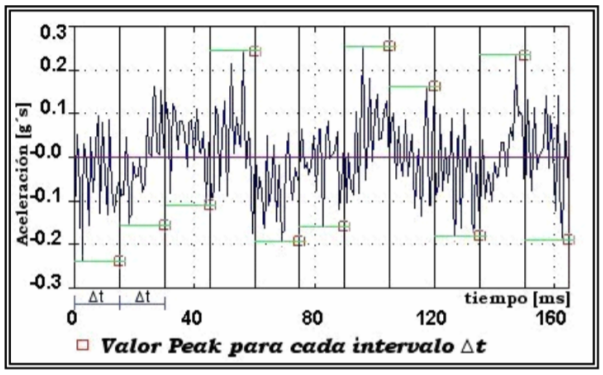


Figura 3: Valores pico en un espectro. Unidad g's: cociente entre la aceleración y la aceleración de gravedad [15]

En este contexto, la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración fue creada por el grupo analítico de Charlotte [13], formado en 1974, y se encarga de la sofisticación de estudios y pruebas en el área de análisis de vibración, control de ruido, y los programas de mantenimiento predictivo. Este grupo ha desarrollado una serie de análisis de vibraciones y seminarios de mantenimiento predictivo que se está enseñando en lugares de todo el mundo y permite tener una referencia de posibles causas de falla en los rodamientos de un sistema. Un extracto de esta carta se muestra en la Figura 4.

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
C. Desalineación de Rodamiento Inclinado Sobre el Eje	2X 1X AXIAL 3X	FASE 1 ±180 2 ±90 3 ±90 4 ±180	Un rodamiento inclinado genera una vibración Axial considerable. Puede causar un movimiento torsional con un cambio de fase aproximado de 180° de arriba a abajo y/o de lado a lado cuando se mide en dirección Axial de la misma carcaza del rodamiento. Intentos de alinear el acople o balancear el rotor no aliviara el problema. Es necesario remover el cojinete e instalarlo correctamente.

Figura 4: Carta Ilustrada de Diagnostico de Vibración [10]

3. Metodología

El estudio realizado a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo BAJA SAE 2004 comprendió las etapas que se indican a continuación.

Etapa 1. Ubicación y Especificación de cada rodamiento utilizado en el sistema de transmisión: Para esto, se empleó la información suministrada por Santana y Matos [16].

Etapa 2. Medición y obtención de datos: Se fijaron las condiciones bajo las cuales se realizarían las mediciones (velocidad de giro del eje de transmisión, disposición del sistema de transmisión); se configuraron los instrumentos de medición, se realizaron las mediciones de velocidad de giro del eje de transmisión acorde a lo establecido en la norma 10816-1995[13], y se efectuaron las mediciones de vibraciones mecánicas usando el escáner de vibraciones mecánicas Skf Microlog analyzer AX series - CMXA 80- bajo distintas condiciones de prueba.

Etapa 3. Obtención de las frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión: a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se determinan las respectivas frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión.

Etapa 4. Estudio de los datos obtenidos: Se graficaron los espectros a partir de las mediciones hechas, y se compararon las frecuencias pico de cada espectro con las frecuencias de falla obtenidas en la Etapa 1, utilizando la técnica *Pekavue* para determinar la localización de las fallas. Luego, se calcularon los valores RMS según el valor pico que refleje alguna falla en el rodamiento, para conocer qué tan severa es la vibración; para esto se comparó dicho valor RMS con los de la tabla de severidad de vibración mecánica establecida en la norma ISO 10816. Finalmente, en los casos donde la comparación arrojó la existencia de una falla, al no contarse con evaluaciones previas que indicasen las posibles causas de falla de los rodamientos, siguiendo lo planteado por Ruiz *et al* [17], se empleó la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración para determinar la posible causa de falla en el respectivo rodamiento.

4. Discusión de resultados

La ubicación de cada rodamiento en el sistema de transmisión del prototipo Baja SAE 2004 se muestra en la Figura 5. Se tiene para este estudio un rodamiento en cada cubo de rueda y un rodamiento en cada salida de la caja de la transmisión.

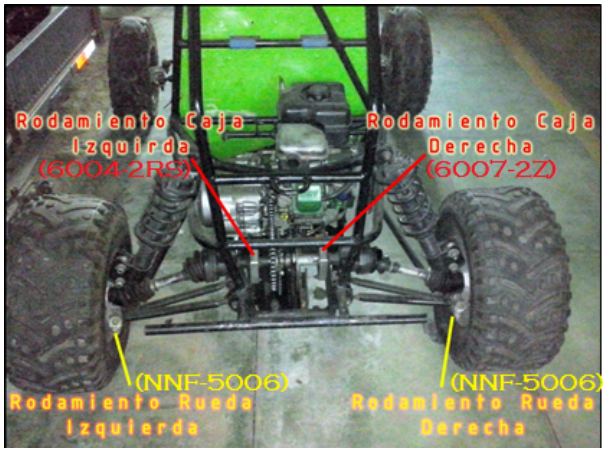


Figura 5: Ubicación de los rodamientos en el sistema de transmisión

Las especificaciones geométricas de cada rodamiento sometido a estudio se muestran en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 1: Especificaciones del rodamiento 6004-2RSH

Diámetro efectivo	31 mm
Diámetro de las bolas	6,35 mm
Número de bolas	9
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento rígido de bolas

Se establecen como velocidades de giro del eje de transmisión las correspondientes a la primera velocidad y la segunda velocidad del prototipo Baja SAE 2004. A través de medición se determina que

Tabla 2: Especificaciones del rodamiento 6007-2Z

Diámetro efectivo	48,5 mm
Diámetro de las bolas	7,938 mm
Número de bolas	11
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento rígido de bolas

Tabla 3: Especificaciones del rodamiento NNF-5006 ADB-2LSV

Diámetro interno	-42,215 mm
Diámetro de los rodillos	5,499 mm
Número de rodillos por fila	24
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento de rodillos cilíndricos de doble fila

estas velocidades de giro son 115 rev/min y 210 rev/min respectivamente.

Debido a que el estudio se centra en un sistema de transmisión de un prototipo mecánico todo terreno, fue necesario establecer criterios de seguridad para poder adquirir la información necesaria de forma segura. Considerando ésto, se procedió a suspender en el aire las ruedas traseras que generan la tracción mediante el uso de pedestales, y de esta forma permitirles girar libremente sin que el prototipo se trasladara de ubicación, dejando a disposición el sistema de transmisión para poder tomar la data.

Se aseguró que el instrumento necesario para la toma de data estuviera configurado a las necesidades de la investigación, de tal forma que manejara las variables requeridas, como velocidad, ciclos por minuto, cantidad de muestras por medición, entre otros. Se estableció trabajar con 10000 ciclos por minuto para cada muestra tomada en cada una de las direcciones (horizontal, vertical, axial) para las cuales se realizó cada medición, tomándose 400 puntos en el intervalo entre 0 y 10000 ciclos por minuto, que es la cantidad de puntos que ofrece el escáner. Se realizaron mediciones para cada una de las velocidades de giro establecidas previamente (115 rev/min y 210 rev/min).

Realizadas las mediciones con el escáner de vibraciones mecánicas Skf Microlog analyzer AX series -CMXA 80- bajo las distintas condiciones de prueba definidas, la data arrojada por dicho escáner se vació y organizó de manera tabulada, para la posterior representación gráfica del espectro de vibración vista en amplitud velocidad. La Figura 6 muestra el espectro correspondiente a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min. Este proceso se repitió para las dos velocidades de giro establecidas previamente y para cada uno de los rodamientos objeto de estudio.

Por otra parte, las frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión se determinaron a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) . Los valores correspondientes a las frecuencias de falla se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 5.

Tabla 4: Frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión. Velocidad de giro: 115 rev/min

Código	BPFI (cpm)	BPFO (cpm)	BSF (cpm)	FTF (cpm)
6004-2RS	623,5	411,49	537,86	45,72
6007-2Z	736,02	528,97	683,81	48,08
NNF-5006	1559,76	1200,23	867,85	50,01

Tabla 5: Frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión. Velocidad de giro: 210 rev/min

Código	BPFI (cpm)	BPFO (cpm)	BSF (cpm)	FTF (cpm)
6004-2RS	1138,64	751,35	981,76	83,48
6007-2Z	1344,03	965,96	1248,69	87,81
NNF-5006	2848,35	2191,64	1584,29	91,31

A continuación se realiza la representación de los armónicos de las frecuencias de falla (1X, 2X, etc.

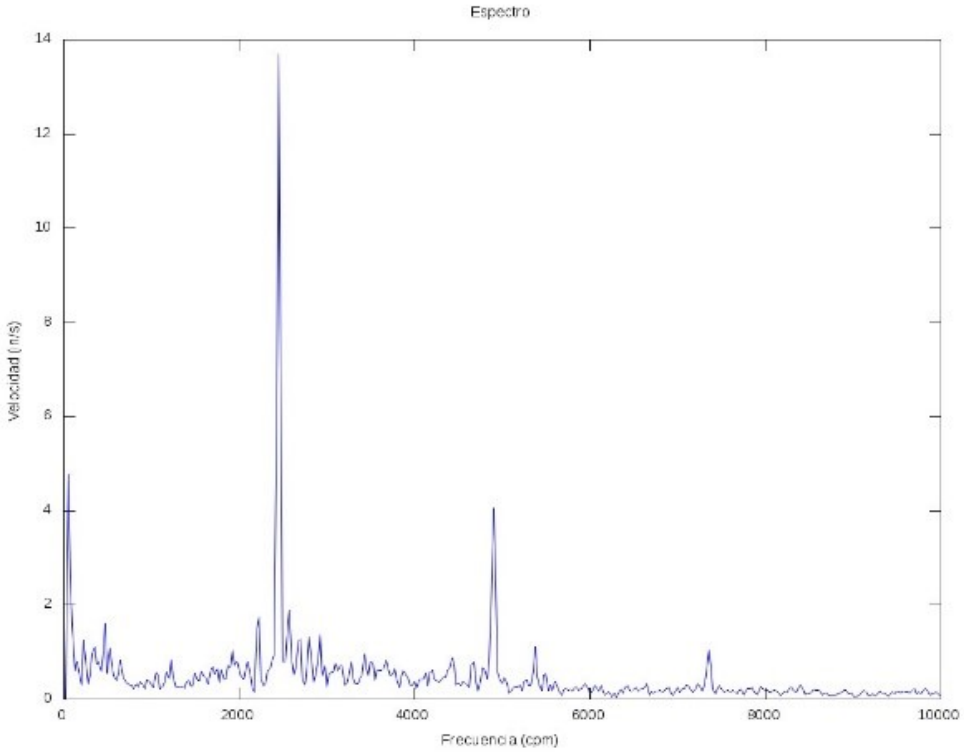


Figura 6: Espectro correspondiente a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

siendo X la frecuencia de falla calculada para cada rodamiento y cada tipo de deterioro – BPFI, BPFO, BSF, FTF – indicada en la Tabla 4 o Tabla 5 según corresponda) para una comparación completa entre las curvas de los espectros y los valores de frecuencia de falla, indispensable para conocer los defectos en los rodamientos. Los valores de frecuencia armónica serán expresados según la amplitud total de la frecuencia evaluada. Para el estudio actual se evaluaron hasta 10000 ciclos por minuto para cada medición. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la representación del Espectro en conjunto con los armónicos de las frecuencias de falla correspondiente a la a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min.

En relación a la frecuencia de falla en la pista interna del rodamiento en la Figura 7 se observan coincidencias entre las BPFI a 1X (1560 ciclos por minuto), 2X (3120 ciclos por minuto) y 3X (4680 ciclos por minuto) y varias frecuencias de pico con amplitudes 0,5876 in/s, 0,7606 in/s y 0,7858 in/s, respectivamente. La existencia de varias coincidencias de frecuencia de picos en el espectro con bajos armónicos de frecuencias de falla consecutivos, podría indicar la consecuencia de un rodamiento con defectos incipientes que no fueron atacados inmediatamente y que se agravaron con el tiempo. Entonces, se infiere que existe una falla en la pista interna del rodamiento, y esta a su vez podría estar causando vibraciones que pueden afectar el funcionamiento del prototipo, por lo que es necesario evaluar la severidad de dichas vibraciones.

Para esto se calcula el valor eficaz utilizando la ecuación (5), donde se tiene para este caso que v_{rms} = 0,4154 in/s. Comparando este valor con los niveles de severidades de la norma ISO 10816 (Figura 2), se aprecia que el valor eficaz excede el rango aceptable de vibraciones, por lo que se infiere que el o los defectos presentes en la pista interna del rodamiento puede ser perjudicial para el sistema de transmisión del prototipo.

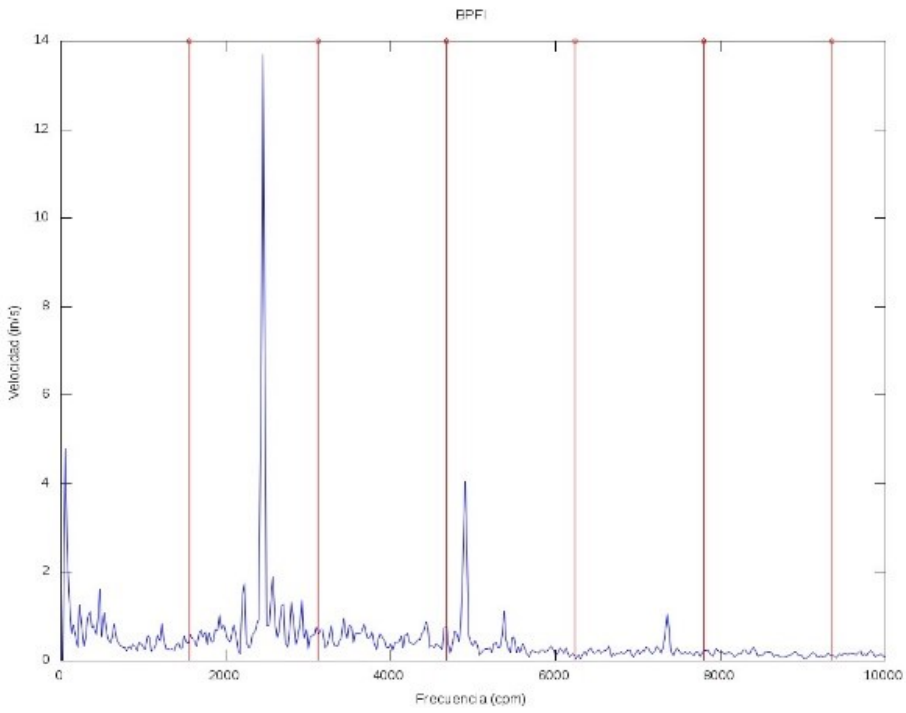


Figura 7: Armónicos de las frecuencias de falla de pista interna sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

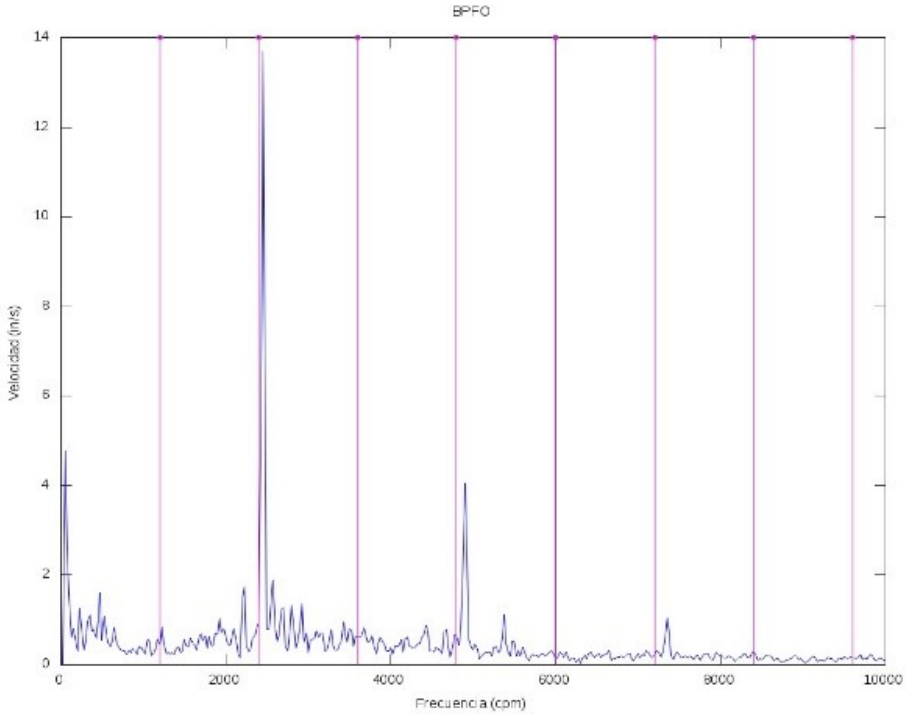


Figura 8: Armónicos de las frecuencias de falla de pista externa sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

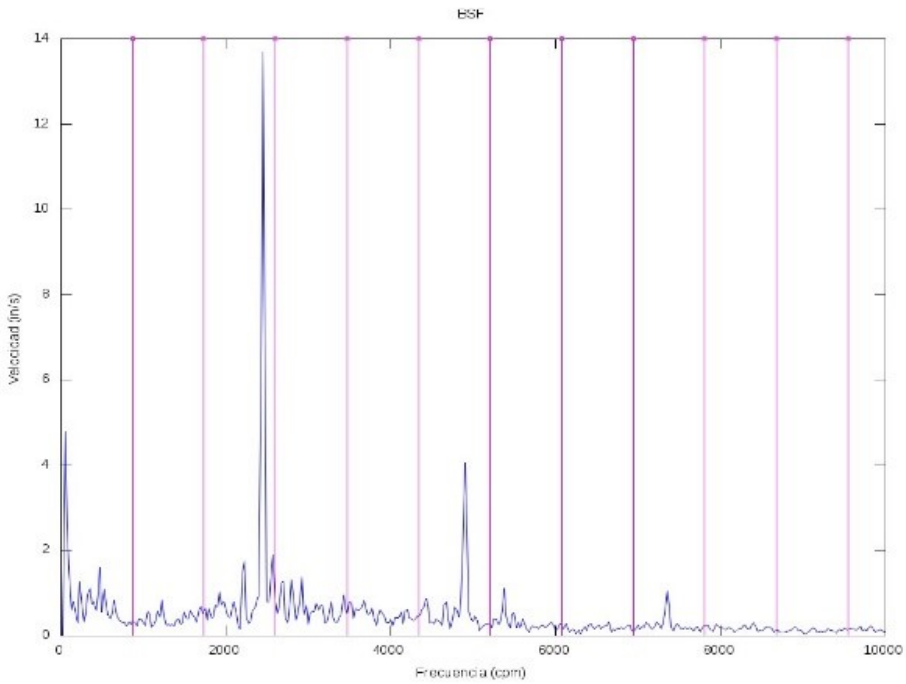


Figura 9: Armónicos de las frecuencias de falla de un rodillo sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

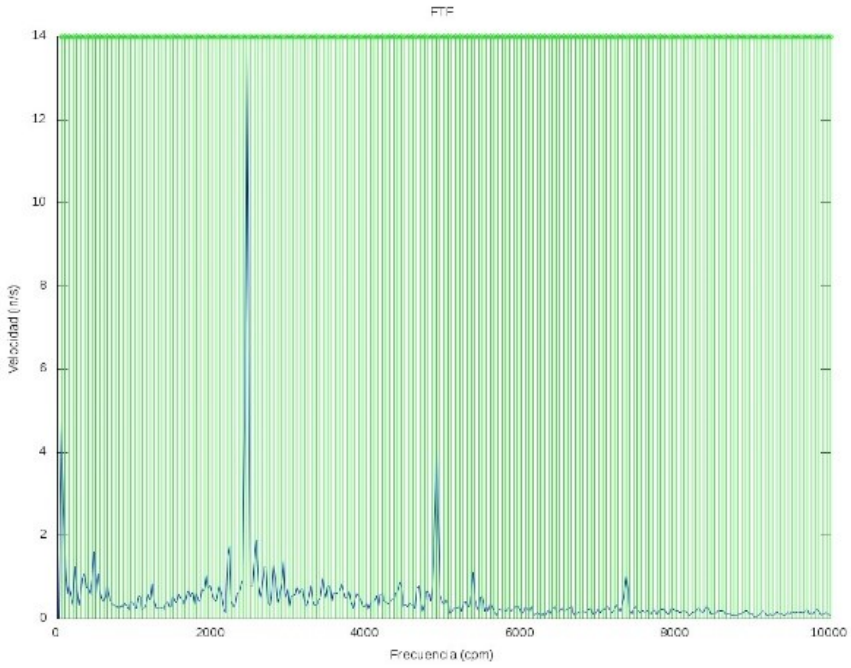


Figura 10: Armónicos de las frecuencias de falla de la jaula sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min.

Adicionalmente, acorde con lo indicado en la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración (un extracto de esta se muestra Figura 4), en virtud que las coincidencias entre las BPFI y las frecuencias de pico se da a 1X (1560 ciclos por minuto), 2X (3120 ciclos por minuto) y 3X (4680 ciclos por minuto), se infiere que la posible causa de falla sea que el rodamiento se encuentre inclinado sobre el eje de transmisión. Esta carta indica, a su vez, que se requiere remover el cojinete e instalarlo correctamente.

En la Figura 8 se observa como un BPFO en 1X coincide con una frecuencia pico de 0,8376 in/s, por lo que se puede deducir que existe algún defecto en la pista externa, cuya severidad de vibración según la norma ISO 10816, con un $v_{rms} = 0,5922$ in/s, se podría considerar como muy grave.

En relación a la posibilidad de falla en los rodillos, en la Figura 9 se observa la ocurrencia de un pico a la frecuencia de 1750 ciclos por minuto con amplitud de espectro de 0,6482 in/s en el armónico 2X, por lo que se deduce que existe una falla en al menos un elemento rodante. Aplicando la ecuación (5) se obtiene $v_{rms} = 0,45838$ in/s , que, según la norma de severidad ISO-10816, indica que el problema es crítico.

Por último se compara, a través de la Figura 10, el espectro con la frecuencia de falla de la jaula desde el mismo pico a 1750 ciclos por minuto donde se apreció una falla por elemento rodante. También se observó un pico para el armónico 35X, no obstante también se visualiza la existencia de una banda en ese mismo punto por lo que se determina un posible desperfecto en la jaula del rodamiento.

El análisis realizado al caso particular del espectro de vibraciones axial en rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min, se realizó de la misma forma a este rodamiento en dirección horizontal y vertical, y en estas tres direcciones a 210 rev/min. De la misma manera, se realizó el mismo análisis al resto de los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo Baja SAE (6007-2Z, 6004-2RS, NNF-5006 de la rueda izquierda), a las dos velocidades de giro previamente establecidas (115 rev/min y 210 rev/min). Los resultados obtenidos en cada análisis en relación a las fallas y severidades de las fallas de los rodamientos estudiados se resumen en las tablas 6 y 7.

Tabla 6: Fallas y severidades de los rodamientos estudiados detectadas por vibraciones para una velocidad de giro de 115 rev/min

Rodamiento	Dirección	BPFI	BPFO	BSF	FTF
6007-2Z	Axial	✓	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	-	-
	Vertical	✓	✓	-	-
6004-2RS	Axial	✓	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	✓	✓	✓	-
NNF-5006 (rueda der.)	Axial	✓	✓	✓	✓
	Horizontal	-	✓	✓	-
	Vertical	✓	✓	-	-
NNF-5006 (rueda izq.)	Axial	-	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	-	-	✓	✓
Severidad	Leve		Aceptable		
	No aceptable		Crítico		

Tabla 7: Fallas y severidades de los rodamientos estudiados detectadas por vibraciones para una velocidad de giro de 210 rev/min

Rodamiento	Dirección	BPFI	BPFO	BSF	FTF
6007-2Z	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	-	-
	Vertical	-	-	✓	-
6004-2RS	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	✓	-
	Vertical	-	-	✓	-
NNF-5006 (rueda der.)	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	-	-
	Vertical	✓	-	✓	-
NNF-5006 (rueda izq.)	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	-	-	-	-
Severidad	Leve		Aceptable		
	No aceptable		Crítico		

En el mismo orden de ideas, acorde a lo establecido la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración creada por el grupo analítico de Charlotte, las posibles causas de los defectos presentados por los rodamientos se indican a continuación:

En el rodamiento 6007-2Z, a partir del espectro de medición vertical comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de los elementos

rodantes (BSF) a 210 rev/min, se determina como posible causa de defecto la desalineación paralela del eje de transmisión con respecto al acople derecho a la caja.

En el rodamiento 6004-2RS, la forma de los espectros de las mediciones hechas para este rodamiento, no se puede determinar la posible causa de los defectos del rodamiento a partir de lo indicado en la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración.

En el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha, a partir del espectro de medición axial comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento (BPFO) a 115 rev/min, se determina como posible causa de defecto que el rodamiento se encuentra inclinado sobre el eje de transmisión.

En el rodamiento NNF-5006 de la rueda izquierda, a partir del espectro de medición horizontal comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista interior de un rodamiento (BPFI) y comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento (BPFO), ambos a 210 rev/min, se determina como posible causa de defecto la desalineación paralela del eje de transmisión con respecto a la rueda izquierda.

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que:

- Todos los rodamientos presentaron al menos dos defectos de severidad crítica a 115 rev/min, mientras que a 210 rev/min hubo poca evidencia de fallas.
- La falla más recurrente fue la presencia de defectos en la pista externa, y la que menos se manifestó fue el defecto en la jaula de los rodamientos.
- A pesar de ser un mismo rodamiento el que se estudia y la medición de vibraciones en la misma dirección, en el caso donde se estudió la medición axial de vibraciones del rodamiento NNF-5006 de la rueda trasera derecha a 115 y 210 rev/min, se observó la diferencia de velocidades de rotación a las que trabaja el rodamiento influye en las vibraciones causadas por los defectos del rodamiento.
- El eje de transmisión posiblemente presenta desalineación paralela con respecto al acople derecho de la caja, según el espectro de vibraciones en la medición vertical del rodamiento 6007-2Z a 210 rev/min, a lo que se pueden atribuir los defectos en pista interna, externa y en una bola del rodamiento.
- El espectro de medición horizontal del rodamiento de la rueda izquierda a 210 rev/min dejó en evidencia que sus defectos en la pista interna, pista externa y al menos uno de sus rodillos, posiblemente sean consecuencia de una desalineación paralela con respecto a la chumacera de la rueda izquierda.
- Según el espectro de la medición axial a 115 rev/min en el rodamiento NNF-5006, es probable que los defectos detectados por el análisis de vibraciones sean consecuencia de un mal montaje o alguna deformación en el rodamiento por un impacto sufrido por el prototipo Baja SAE, pues el comportamiento del espectro sugiere que el rodamiento tiene una inclinación sobre el eje de transmisión.
- Por la forma en la que se presentaron los espectros de vibración, no se puede determinar la posible causa de los defectos del rodamiento 6004-2RS aplicando un análisis de vibraciones al mismo.
- Los dos rodamientos NNF-5006, cuyas especificaciones eran exactamente iguales y cumplían el mismo rol en el sistema de transmisión del prototipo, presentaron las mismas fallas, pese a que fueron detectadas en mediciones de direcciones distintas.
- A pesar de haber realizado el análisis de vibraciones a dos velocidades de rotación distintas, en el rodamiento NNF-5006 de la rueda izquierda los defectos de la pista interna, la pista externa y de uno de los rodillos hicieron presencia a ambas velocidades y en la misma dirección de la medición (horizontal), aun cuando se observen notables diferencias entre los espectros de vibración que estas puedan tener.

5. Conclusiones

El estudio realizado deja en evidencia que la posibilidad de falla en rodamientos a través estudio no invasivo de vibraciones es sensible a la velocidad de giro del eje de transmisión donde se ubiquen tales rodamientos, en virtud que a ciertas velocidades de giro pudiesen observarse posibilidades de falla que no se observan a otras velocidades de giro.

La detección de posibilidad de falla en rodamientos a través estudio no invasivo de vibraciones depende de la dirección (axial, horizontal, vertical) en la cual se realice la medición, en virtud que de acuerdo a las mediciones realizadas en el presente estudio en una dirección de medición en particular se detecta una posibilidad de falla que no se detecta en otras direcciones de medición.

Pueden darse casos donde a través del uso de la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración en conjunto con un espectro de vibración dado no se logre determinar la posible causa de falla de un rodamiento, por lo que se requeriría usar algún método alternativo para la determinación de la posible causa de falla.

6. Referencias

[1] W. Olarte, M. Botero, y B. A. Cañon, "Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo," *Scientia et technica*, vol. 16, no. 45, pp. 219–222, 2010.

[2] E. Estupiñán, C. San Martin, y R. Solaligue, "Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas," *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, vol. 14, no. 1, pp. 7–15, 2006.

[3] W. Paguay y C. E. Satán, "Construcción de un simulador para el diagnóstico de modos de fallas en cojinetes planos mediante el análisis de vibraciones para la Facultad de Mecánica de La Espoch," Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero de Mantenimiento, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba, Ecuador, 2017.

[4] J. Peralta, "Desarrollo de un procedimiento para el diagnóstico de crucetas a través del análisis de vibraciones en trenes de potencia posterior y su contribución al mantenimiento predictivo," Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador, 2019.

[5] M. Guevara y L. Landa, "Análisis de vibraciones en el motor de combustión interna J20-A a través de simulación de modos de fallas para contribuir el mantenimiento predictivo," Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador, 2019.

[6] M. E. Moreno-Sánchez, J. A. Villarraga-Ossa, y R. Moreno-Sánchez, "Diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo y a la desalineación," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 2, pp. 187–197, 2019.

[7] Z. Y. Medrano Hurtado y C. Pérez Tello, "Validación de señales vibro-acústicas para el diagnóstico de fallas en rodamientos en un generador síncrono," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 51–81, 2017.

[8] C. San Martín, E. Estupiñán, and D. San Martín, "A methodology for the detection and diagnostic of localized faults in gears and rolling bearings systems," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 44–52, 2010.

[9] J. E. Estévez-Rodríguez y J. M. Bernal-de Lázaro, "Análisis de los rodamientos usados en electro-ventiladores del sistema de refrigeración de motores Hyundai," *Ingeniería Mecánica*, vol. 22, no. 2, pp. 85–91, 2019.

[10] A. Albornoz y E. López, "Estudio de vibraciones en los rodamientos del sistema de transmisión de un Prototipo Baja SAE." Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bárbula, Venezuela, 2016.

[11] B. Graney and K. Starry, "Rolling Element Bearing Analysis," *Materials Evaluation*, vol. 70, no. 1, pp. 78–85, 2011.

[12] M. Salazar, "Determinación de espectros de aceleración para el torno Prazi SD-400 variando las condiciones de operación," Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Área de Mantenimiento, Medellín, Colombia, 2007.

[13] ISO, *ISO-10816: Vibración Mecánica*, International Organization for Standardization, 1998.

[14] R. Moscoso, "Programa de control del mantenimiento proactivo y correctivo en equipos mecánicos del transporte de hidrocarburos en el Ecuador," Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial, Unidad de Posgrado, Lima, Perú, 2017.

[15] A. Álvarez, "Técnicas de diagnóstico de daños incipientes en rodamientos," Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero en Ejecución en Mecánica, Universidad de Magallanes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica, Punta Arenas, Chile, 2005.

[16] G. Santana y J. Matos, "Metodología para el Diseño de la Transmisión de un Vehículo Prototipo Baja SAE," Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bárbula, Venezuela, 2011.

[17] S. M. Ruiz, L. V. Henríquez, y C. V. Caballis, "Metodología para diagnosticar fallas localizadas en equipos de una línea de producción de carbón activado," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, pp. 93–108, 2018.

Use of synthetic series of average monthly flows for planning the operation of the Peruvian interconnected electrical system

Douglas Sarango-Julca * , Abel Mejía-Marcacuzco , Edilberto Guevara-Pérez

Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Abstract.- The generation of synthetic monthly flows is a good option for planning studies of the generation of electric power of the National Interconnected Electrical System (SEIN). For research, historical hydrological series of 23 river basins are used. The best fit model for the generation of synthetic series is the Periodic Auto Regresive of Moving Averages - PARMA (1,1). For each point of interest, 300 synthetic series of 52-year long monthly flows (1965–2016) were generated, thus obtaining the expected monthly synthetic series, which was used in the Simulation Model of the Optimal Economic Operation of the Peruvian Electric System (PERSEO) for the planning of SEIN power generation during the 2016-2019 period. For the investigation, the Mantaro river basin was selected as it currently produces more than 30 % of the energy generated in the SEIN. In this paper, the results obtained are presented, having found a difference of 1,70 US$ /MWh in the value of the marginal cost of energy when comparing the use of synthetic series with the historical series of monthly flows, which implies a variation, in terms of revenue of US$ 33,79 million for the company ELECTROPERU SA concessionaire of this basin.

Keywords: synthetic flows; PARMA; PERSEO; hydropower; thermoelectric power.

Uso de series sintéticas de caudales medios mensuales en la planificación de la operación del sistema eléctrico interconectado nacional del Perú

Resumen.- La generación de caudales mensuales sintéticos es una buena opción para los estudios de planeamiento de la generación de energía eléctrica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Para la investigación se usan series hidrológicas históricas de 23 cuencas hidrográficas. El modelo de mejor ajuste para la generación de las series sintéticas es el Auto Regresivo Periódico de Medias Móviles - PARMA (1,1). Para cada punto de interés se generaron 300 series sintéticas de caudales mensuales de 52 años de longitud (1965–2016), obteniéndose así la serie sintética mensual esperada, la cual se utilizó en el Modelo de Simulación de la Operación Económica Optima del Sistema Eléctrico Peruano (PERSEO) para el planeamiento de la generación de energía del SEIN durante el periodo 2016-2019. Para la investigación se seleccionó la cuenca del río Mantaro por ser la que actualmente produce más del 30 % de la energía generada en el SEIN. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos, habiéndose encontrado una diferencia de 1,70 US$/MWh en el valor del costo marginal de energía al comparar el uso de series sintéticas con las series históricas de caudales mensuales, lo que implica una variación, en términos de ingresos, de 33,79 millones US$ para la empresa ELECTROPERU S.A. concesionaria de esta cuenca.

Palabras clave: caudales sintéticos; PARMA; PERSEO; centrales hidráulicas; centrales térmicas.

Recibido: 06 de febrero, 2020.
Aceptado: 27 de marzo, 2020.

1. Introducción

El Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería de Perú (OSINERGMIN) por mandato de la Ley de Concesiones Eléctricas - D.L. No. 25844, debe garantizar la seguridad de la generación de energía eléctrica para el abastecimiento de la demanda del país, planificando la expansión de la generación del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) (Figura 1) mediante la optimización de los recursos hídricos y térmicos existentes y futuros usando el Modelo de Simulación de la Operación Económica Óptima del Sistema Eléctrico Peruano (PERSEO).

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*dsarangoj@unmsm.edu.pe (D. Sarango)

Las centrales térmicas del SEIN generan el 48 % de la energía total del país utilizando el Gas Natural proveniente de Camisea y los combustibles derivados de petróleo y Carbón; el 52 % restante de la producción energética proviene de la energía hidroeléctrica generada en las centrales hidráulicas construidas en 23 cuencas hidrográficas del país.

El modelo PERSEO usa series históricas de caudales medios mensuales de ingreso a los embalses que alimentan las centrales hidroeléctricas del SEIN. Dichas series de caudales disponibles corresponden al período de 52 años (1965–2016). El modelo calcula el Costo Marginal Promedio de Energía (CMP) para el período 2016-2019 en base a la generación de energía de las centrales térmicas e hidroeléctricas, empleando un pronóstico de caudales para el período 2017-2019 en base a series históricas de caudales mensuales naturales afluentes en el punto de interés de cada cuenca hidrográfica. El CMP, es utilizado para el pago de la generación eléctrica de las empresas generadoras que forman parte del SEIN.

Con los modelos de relleno y extensión de la información de las series de caudales mensuales históricas, solo se generan valores medios de menor variabilidad que las series reales; y por la naturaleza de dichos modelos, las series así obtenidas tienden a mostrar una mayor dependencia temporal y espacial debido a que no se toma en cuenta el componente aleatorio. Una de las formas de superar este problema es usando modelos estocásticos para la generación de series sintéticas de caudales mensuales que posean características similares a las de las usadas en el modelo PERSEO. Además, es posible generar varias series sintéticas de caudales mensuales en los lugares donde solo existe una serie histórica.

En situaciones con escasez de información, como es el caso de Perú, la generación de caudales mensuales sintéticos es una buena opción para los estudios del planeamiento de la generación de energía eléctrica. Por eso, con la finalidad de mejorar la operación del sistema eléctrico interconectado nacional mediante una mejor planificación, se ha llevado a cabo esta investigación con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de los modelos estocásticos para la generación de series sintéticas en las centrales hidroeléctricas que conforman el SEIN y así mejorar la predictibilidad del modelo PERSEO.

2. Antecedentes

Existen muchos estudios sobre la generación de series sintéticas de caudales, como el análisis estocástico de la serie de tiempo de caudales mensuales del Río Caroní-Venezuela en la estación hidrométrica Guri para el período 1950–2003, utilizando el "método clásico" de Box y Jenkins [1]. Los modelos estocásticos utilizados fueron los modelos SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)s, y un análisis de residuos condujo a la selección del modelo SARIMA$(1,0,0)(0,1,1)_{12}$, como el que está mejor ajustado a los datos. Se ha realizado la modelación estocástica para la interpretación de los caudales medios anuales de la cuenca del río Santa-Perú, determinándose que el modelo autorregresivo de primer orden AR(1) es el más adecuado. Para verificar la validación del modelamiento se han comparado las estadísticas media y variancia de las series históricas y de las series generadas, encontrándose resultados aceptables [2].

También se tiene el caso de modelo para el manejo de la incertidumbre hidrológica en la planificación de la operación del sistema eléctrico Chileno (SIC), donde se determinó que el mejor modelo para la modelación de las series hidrológicas del SIC es un modelo CPARMA [3]. Otro caso es la aplicación del modelo (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)s para el modelamiento de las series hidrológicas del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del Perú [4]. De igual manera se han usado series sintéticas de caudales mensuales en el cálculo del costo marginal de energía del sistema eléctrico interconectado nacional del Perú, usándose el modelo HEC-4 del Hydrological Engineering Center de los EE.UU., encontrándose que los costos marginales usando series mensuales sintéticas son menores que los obtenidos con las series mensuales históricas, para los casos de período seco, medio y húmedo [5].

También se tiene el uso de generación de series sintéticas mensuales del río Chira en el

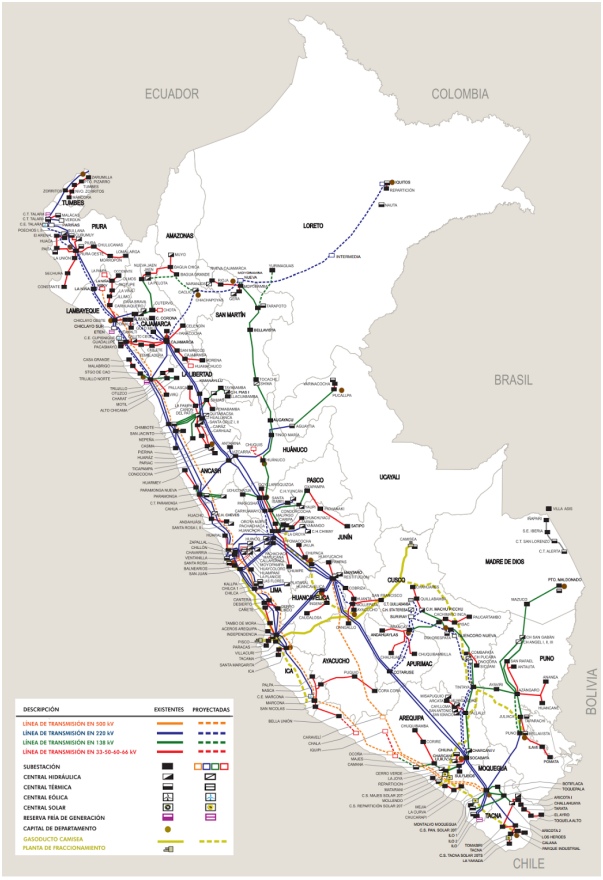


Figura 1: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) al 2016 [6]

Perú mediante el uso de los modelos markovianos AR(2) y AR(3) que genera los mejores estadísticos históricos de las series analizada, donde para la calibración y validación se usó el programa de cómputo SAMS 2000 [7]. Otra experiencia del uso de series sintéticas de caudales mensuales mediante modelo markovianos se da en la modelación hidrológica y su efecto en los precios Spot de energía y potencia del Sistema Eléctrico Central Chileno [8].

En el sistema eléctrico de Colombia, el componente hidráulico es el 70 % de la capacidad instalada, la evolución de la hidrología desempeña un papel fundamental en la operación comercial de las centrales hidroeléctricas del sistema y por tanto en la determinación del costo de la electricidad, por ende la modelación de las series hidrológicas para la generación de series sintéticas es importante para ver la viabilidad de proyectos, usando para ello el modelo de Thomas y Fiering [9].

3. Metodología

3.1. Modelo estocástico

Los modelos estocásticos son adecuados para describir las series cronológicas o series de tiempo hidrológicas. Las series cronológicas se dividen en dos categorías: determinísticas y estocásticas. Las series determinísticas son aquellas cuyo valor en cualquier instante se puede determinar con certeza y estas series pueden ser periódicas, semiperiódicas, o presentar tendencias o saltos.

Las series estocásticas pueden ser estacionarias o no según sus parámetros (media, varianza, etc.) sean independientes o no a través del tiempo [10].

3.2. Series de tiempo o series cronológicas

Si cada valor de $y_1, y_2, \cdots, y_t$ en la serie es extraído al azar de una distribución de probabilidad, al modelar dicho proceso, se intenta describir las características de su aleatoriedad, esto ayudaría a inferir algo sobre las probabilidades asociadas con los valores futuros alternativos de la serie. Para generalizar se puede decir que la serie observada $y_1, \cdots, y_t$ es extraída de un conjunto de variables aleatorias distribuidas en forma conjunta. Si de alguna manera se pudiera especificar la función de distribución de probabilidad de la serie entonces se podría determinar la probabilidad del resultado futuro. Sin embargo, la especificación completa de la función de la distribución de probabilidad para la serie de tiempo por lo general es imposible. Por lo tanto, es usual construir un modelo simplificado de las series de tiempo que explica su aleatoriedad de manera que sea útil para pronosticar los valores futuros que son los modelos estocásticos (modelos autorregresivos, modelos de promedio móvil, etc.) [11].

3.3. Análisis de las series temporales

Son tres los tipos de análisis o procedimientos metodológicos para la evaluación o estudio de series temporales como son: los métodos de descomposición, método de análisis causal y el método de Box–Jenkins. El método de descomposición, consiste en dividir la serie temporal en sus componentes: tendencia, ciclo, componente estacional y componente irregular

(aleatorio). El método de análisis causal, consiste en explicar la evolución de la serie temporal mediante una ecuación que relaciona la variable en estudio con otras variables que inciden sobre ella. El Método de Box–Jenkins, consiste en explicar la evolución de la serie temporal (variable temporal) en función del comportamiento en el pasado de la misma serie temporal. Conocida la estructura de dependencia entre valores sucesivos de la serie mediante modelos integrados autorregresivos de medias móviles (ARIMA) es posible predecir la evolución futura de la serie temporal a través de su comportamiento pasado [12].

3.3.1. Series de tiempo estacionarias

Un proceso estocástico es estacionario en el sentido débil, si su media y su varianza son constantes en el tiempo y si el valor de la covarianza entre dos periodos depende sólo de la distancia o rezago entre estos dos periodos y no del tiempo en el cual se calculó la covarianza. La esencia básica para el análisis estocástico es que el proceso sea estacionario, es decir que las propiedades estadísticas del proceso no varían en el tiempo. Así, las propiedades de los registros históricos se pueden utilizar para derivar series sintéticas largas. Esta propiedad estacionaria se refleja gráficamente en que los valores de la serie tienden a oscilar alrededor de una media constante y la variabilidad con respecto a esa media también permanece constante en el tiempo. Una serie temporal débilmente es estacionaria sí se cumplen las siguientes ecuaciones (1), (2) y (3) según [13]:

$$E\left[X_t\right] = \mu \qquad (\text{constante } \forall\, t) \tag{1}$$

$$VAR\left[X_t\right] = \sigma^2 \qquad (\text{constante } \forall\, t) \tag{2}$$

$$COV\left[X_t, X_{t,k}\right] = \gamma_k (\text{independiente de } t \;\forall\; k) \tag{3}$$

3.3.2. Prueba de estacionariedad

Las pruebas de estacionariedad de Dickey–Fuller son mostradas como la prueba estándar para verificar la estacionariedad de una serie [14].

3.3.3. Modelos ARMA(p,q) y PARMA(p,q)

Existe una amplia literatura de la estimación de modelos para series estacionarias donde están definidos los modelos autorregresivos AR(p), los modelos media móvil MA(q) y los modelos ARMA(p,q) y PARMA(p,q) [11], [13], [14], [15], [16].

3.3.4. Estimación y validación del modelo

Para determinar el modelo adecuado para explicar el comportamiento de una serie de tiempo, la metodología consiste en cuatro pasos: identificación, estimación, examen de diagnóstico y pronóstico [13], [14], [16].

3.3.5. Análisis de las series de tiempo hidrológico

En el análisis de series hidrológicas es importante evaluar las propiedades estadísticas de las series de descargas medias mensuales, así como es importante identificar y evaluar las tendencias, los saltos, la estacionalidad y la no normalidad, las cuales se utilizan para la construcción de modelos matemáticos, para generar registros sintéticos de hidrología, para pronosticar los eventos hidrológicos, para detectar tendencias, saltos, para llenar datos incompletos y para extender o ampliar los registros de datos.

3.4. Componentes de la estructura de la serie de tiempo hidrológica

Una serie de tiempo hidrológica puede ser dividida o descompuesta en sus componentes, como son: tendencias, cambios o saltos, estacionalidad, etc.

3.4.1. Saltos y tendencias

En general, los factores naturales y provocados por el hombre pueden producir tendencias graduales y cambios o saltos instantáneos en series hidrológicas. El calentamiento global y los cambios climáticos están creando conciencia en los hidrólogos de la existencia de tendencias y saltos en las series de tiempo hidrológicas. Para fines de pronóstico se deben tener series hidrológicas libres de tendencia y saltos [17].

3.5. Diagnosis del modelo y pronóstico

Para verificar si el modelo seleccionado es adecuado, existen dos métodos: el primero consiste en crear un modelo con más rezagos que los identificados en el paso previo y verificar que los rezagos extra no son estadísticamente significativos. El segundo método consiste en analizar los residuos del modelo seleccionado. Si el modelo seleccionado captura adecuadamente la dinámica de la variable, los errores deberían ser ruidos blancos, es decir no autocorrelacionados [15].

En la diagnosis del modelo se requiere comprobar que las hipótesis básicas realizadas a los residuos sean ciertas. Los residuos deben tener [14], [18]:

a) media marginal, igual a cero;

b) variancia marginal constante;

c) no debe existir correlación para cualquier retardo.

Adicionalmente se acostumbra exigir que los residuos sigan una distribución normal. Estos contrastes son:

a) Para comprobar si la media es cero, la clásica prueba t-Student es usada con hipótesis nula $H_0 : \mu = 0$

b) Para comprobar si la varianza es constante, la prueba F de Fisher es usada para comparar la varianza de dos intervalos I y J de los residuos, con hipótesis nula $H_0 : \sigma_I^2 = \sigma_J^2$

c) Ausencia de correlación serial. Si los residuos se comportaran como un ruido blanco, los coeficientes de la FAC y FACP muestrales deben ser prácticamente nulos para todos los retardos.

d) Prueba de normalidad, la clásica prueba de normalidad suele ser complementada por las pruebas de kurtosis y sesgo (asimetría) indicadas en [16].

3.6. Modelo PARMA (p,q)

El modelo PARMA (p,q) es una variante del modelo Autoregresivo de medias Móviles (ARMA) que permite hacer la modelación para series mensuales, y que tiene la formulación matemática expresada en [16] según la ecuación (4), ecuación (5) y ecuación (6).

$$\varphi_\tau(B) Y_{v,\tau} = \theta_\tau(B) e \quad (4)$$

Siendo lo parámetros definidos por:

$$\theta_\tau(B) = 1 - \varphi_{1-\tau} B^1 - \varphi_{2-\tau} B^2 - \cdots - \varphi_{p-\tau} B^p \quad (5)$$

$$\theta_\tau(B) = 1 - \varphi_{1-\tau} B^1 - \varphi_{2-\tau} B^2 - \cdots - \varphi_{q-\tau} B^q \quad (6)$$

Para la aplicación del modelo PARMA (p,q) en las cuencas hidrograficas del SEIN, se ha usado el modelo Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation (SAMS v.2009), cuyos detalles se pueden encontrar en [16].

3.7. Determinación de las series sintéticas de caudales mensuales con el modelo $PARMA(p,q)$

Para determinar el mejor modelo PARMA(p,q) para la generación de series sintéticas de caudales mensuales en un punto de interés de una cuenca hidrográfica del SEIN, en SAMS v.2009, la secuencia es como sigue:

- Se elabora en el formato respectivo el archivo de datos a nivel mensual de la serie de caudales históricos mensuales naturales afluentes a un punto de interés de la cuenca en estudio.
- Se obtiene el histograma de caudales a nivel anual de la serie de caudales mensuales en estudio.
- Se obtiene la función de autocorrelación (AFC) y función de autocorrelación parcial (PAFC) para cada mes de la serie de caudales mensuales en estudio.
- Se realiza la normalización de los datos de caudales mensuales de la serie en estudio. Se escoge una transformación, y se analizan los resultados de los test de Skewness y Filliben.

- Si en todos los meses los resultados de los test de Skewness y Filliben son de aceptación, se inicia el proceso de escoger el mejor PARMA(p, q).
- Con SAMS v.2009 se analizan los siguientes modelos: PARMA(1,0), PARMA(1,1), PARMA(1,2), PARMA(1,3), PARMA(2,0), PARMA(2,1), PARMA(2,2), PARMA(2,3), PARMA(3,0), PARMA(3,1), PARMA(3,2), PARMA(3,3), obteniéndose para cada uno de ellos el valor del parámetro AICC (coeficiente de Akique) y SIC (error bayesiano) para cada mes de la serie de caudales analizada.
- El mejor modelo PARMA (p,q) para la generación de caudales sintéticos a nivel mensual para la serie estudiada, es aquel que tiene los menores valores del parámetro AICC en los meses del período de avenidas (enero, febrero y marzo) [16].
- Con SAMS v.2009 y el modelo PARMA(p, q), escogido, se procede a generar 300 series sintéticas de caudales mensuales en el punto de estudio.
- Se determina la serie sintética esperada de caudales medios mensuales de las 300 series sintéticas generadas para el punto de interés, con una distribución Weibull se elabora la curva de duración de los caudales promedio multianuales de las 300 series sintéticas, y se determina el caudal promedio multianual al 50 % de persistencia, el cual identifica a la serie sintética de caudal mensual más probable afluente al punto de estudio.
- El procedimiento antes descrito se aplica a las series históricas de caudales mensuales naturales afluentes a los 83 puntos de interés ubicados en las cuencas hidrográficas del SEIN.

3.8. *Planeamiento de la generación de energía del SEIN - Modelo PERSEO*

El Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), es un sistema hidrotérmico, los suministradores de energía eléctrica son las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. El consumidor se representa por la demanda total del mercado eléctrico. Las centrales hidroeléctricas turbinan el agua regulada por uno o más embalses, dispuestos o no en cascada, a lo largo de una o más cuencas hidrográficas, lo cual permite almacenar energía para usarla en diferentes periodos [19].

En la operación de los sistemas hidrotérmicos el manejo de la energía hídrica almacenada en los embalses del sistema es importante, porque evita los gastos de combustible que ocasionaría la generación térmica.

Las ecuaciones de conservación del agua dentro del modelo PERSEO, representan el balance hídrico en cada punto de interés de las cuencas hidrográficas, es así como el volumen final del embalse en la etapa $\tau + 1$, está representado por las ecuaciones (7), (8) y la Figura 2 [19].

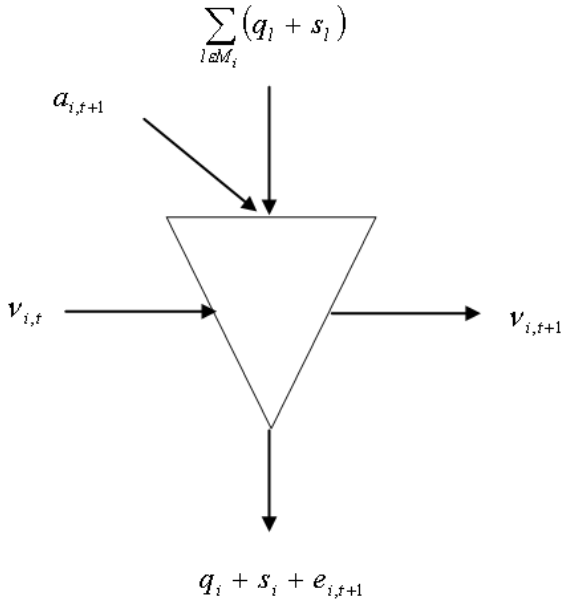


Figura 2: Balance hídrico en un embalse de regulación estacional en PERSEO

$$v_{i,\tau+1} = v_{i,\tau} + a_{i,\tau+1} + \sum_{l \varepsilon Mi} (q_l + s_l) - q_i - s_i - e_{i,\tau+1} \quad (7)$$

$$e_{i,\tau+1} = \varepsilon v_{i,\tau} \quad (8)$$

Donde:

$v_{i,\tau}$: volumen de agua almacenado en el embalse de la i-ésima planta al inicio de la etapa τ (igual al volumen almacenado en la etapa $(\tau - 1)$)
$a_{i,\tau}$: volumen de agua afluente al embalse de la i-ésima planta hidroeléctrica durante la etapa τ.
$s_{i,\tau}$: volumen de agua vertido por la i-ésima planta hidroeléctrica durante la etapa τ.
M_i: conjunto de plantas hidroeléctricas aguas arriba de la i-ésima planta hidroeléctrica.
q_l: volumen incremental afluente al embalse.
q_i: volumen turbinados i-ésima planta hidroeléctrica.
$e_{i,\tau}$: volumen de agua evaporada en el embalse de la i-ésima planta hidroeléctrica en la etapa τ.
ε: porcentaje de evaporación respecto del volumen almacenado en el embalse.

El modelo matemático de operación de sistemas hidrotérmicos para una secuencia hidrológica s, se puede representar a través del modelo recursivo en programación dinámica estocástica, representado por la ecuación (9) [19]:

$$\alpha_\tau(v_\tau, A_{\tau-1}) = \mathrm{E}_{A_\tau/A_{\tau+1}} \left\{ Min \left[\sum_{j=1}^{N_j} co_j gt_{j,t} + \alpha_{\tau+1}(v_{\tau+1}, A_\tau) \right] \right\} \tag{9}$$

$$s/a$$

$$\sum_{j\varepsilon k} gt_{j,t} + \sum_{i\varepsilon k} \rho_i q_{i,j} + \sum_{m\varepsilon\Omega(k)} ((1 - 0,5\sigma_{mk,t}) f_{mk,t} - (1 + 0,5\sigma_{mk,t}) f_{mk,t}) = d_{k,t} \qquad \pi^{cp}_{d_{k,\tau,S}}$$

$$gt_{j,t} \leq \overline{gt}_{j,t} \qquad \pi^{cp}_{gt_{j,\tau,S}}$$

$$f_{mk,t} \leq \overline{f}_{mk} \qquad \pi^{cp}_{f_{mk,\tau,S}}$$

$$v_{i,t+1} - v_{i,t} - \sum_{l\varepsilon M_i} (q_l - s_l) + q_i + s_i = a_{i,t} - e_{i,t} \qquad \pi^{cp}_{a_{i,\tau,S}}$$

$$v_{i,t,k-1} - v_{i,t,k} - \sum_{l\varepsilon M_i} (q_l + s_l) + q_i + s_i = a_{i,t}$$

$$v_{i,t} \leq \overline{v}_{i,t} \qquad \pi^{cp}_{v_{i,\tau,S}}$$

$$v_{i,t} \geq \underline{v}_{i,t}$$

$$v_{i,t,k} \leq \overline{v}_i$$

$$q_{i,t} \leq \overline{q}_{i,t} \qquad \pi^{cp}_{q_{i,\tau,S}}$$

$$q_{i,t} \geq \underline{q}_{i,t}$$

$$r_{i,t} \leq \overline{r}_{i,t} \qquad \pi^{cp}_{r_{i,\tau,S}}$$

$$r_{i,t} \geq \underline{r}_{i,t}$$

$$f_{mk,t} = f_{mk}(\theta_m, \theta_k) \geq 0$$

$$\forall\ k = 1, \cdots, N_k;\ i = 1, \cdots, N_i;\ j = 1, \cdots, N_j;\ t = 1, \cdots, N_t$$

Donde:

i: índice de plantas de generación hidroeléctrica.
j: índice de plantas de generación térmica.
k: índice de las barras equivalentes.
s: índice de secuencias hidrológicas.
t: índice de etapas.
N_k: número total de barras equivalentes en el

sistema.

Ω_k: conjunto de líneas de transmisión conectadas a la barra equivalente k.

$f_{mk,t}$: flujo de energía de la barra equivalente m para la barra equivalente k en la etapa t.

$\gamma_{mk,t}$: coeficiente de pérdidas de flujo de transmisión de m para k durante la etapa t, expresado en % del flujo actual.

$d_{k,t}$: demanda de energía en la barra equivalente k durante la etapa t.

$\overline{v}_{i,t}$: volumen del embalse máximo.

$\underline{v}_{i,t}$: volumen del embalse mínimo.

$\overline{v}_{i}$: volumen máximo en los reservorios diarios

$q_{i,t}$: volumen turbinado en la *i-ésima* planta hidroeléctrica durante la etapa t.

$\overline{q}_{i,t}$: volumen turbinado máximo.

$\underline{q}_{i,t}$: volumen turbinado mínimo

$r_{i,t}$: caudales regulados

$\underline{r}_{i,t}$: caudales regulados mínimos de irrigación, navegación o recreación

$\overline{r}_{i,t}$: caudales regulados máximos caso de grandes avenidas.

$\pi^{cp}_{d_{k,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación de la demanda de la barra equivalente k durante la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{gt_{j,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación de la capacidad disponible de generación de la *j-ésima* planta térmica en la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{f_{mk,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación del flujo de energía en la barra equivalente m para la barra equivalente k en la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{a_{i,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación del volumen de agua afluente al embalse de la *i-ésima* planta hidroeléctrica en la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{v_{i,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación del volumen de agua almacenado en el embalse de *i-ésima* planta hidroeléctrica durante la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{q_{i,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación del volumen turbinado de la *i-ésima* planta hidroeléctrica durante la etapa t para la secuencia hidrológica s.

$\pi^{cp}_{r_{i,t,s}}$: multiplicador dual que expresa la sensibilidad del costo de producción a la variación de los caudales regulados de la *i-ésima* planta hidroeléctrica durante la etapa t para la secuencia hidrológica s.

3.9. Planeamiento de la generación del SEIN, periodo 2016-2019

La metodología seguida para el planeamiento de la expansión de la generación de SEIN es la siguiente:

- Determinación de la demanda eléctrica y su proyección en el período 2016-2019.
- Establecimiento de las premisas económicas para el planeamiento de la expansión de la generación del SEIN.
- Determinación de las series de caudales naturales (1965-2016) afluentes a los 83 puntos de interés de las cuencas hidrográficas del SEIN.
- Determinación de las características técnicas y económicas de las centrales hidráulicas y centrales térmicas existentes del SEIN.
- Determinación de las características técnicas y económicas de las centrales hidráulicas y centrales térmicas en proyecto para la expansión del SEIN (2016-2019).
- Elección del modelo PERSEO para el planeamiento de la expansión de la generación del SEIN.
- Elaboración de los archivos de datos de entrada del modelo PERSEO.

- Obtención los resultados técnicos y económicos de la operación del SEIN utilizando series históricas de caudales medios mensuales naturales como es por ejemplo: costos marginales actualizados, volumen útil en los embalse del sistema, generación de energía y potencia en las centrales hidroeléctricas, ingreso neto por venta de energía de las centrales hidroeléctricas.

- Obtención los resultados técnicos y económicos de la operación del SEIN utilizando series sintéticas de caudales mensuales más probables afluentes a los puntos de interés del sistema.

3.10. Información utilizada

a) Información de caudales mensuales. Se cuenta con series históricas de caudales mensuales naturales de las 23 cuencas hidrográficas del SEIN, de 52 años de datos, periodo 1965-2016. Esta información se ha obtenido de los estudios hidrológicos elaborados por las empresas generadoras de electricidad del SEIN [6].

b) Demanda Eléctrica. Se consideran la proyección de la demanda eléctrica de estudio de la Fijación Tarifaria de mayo 2017 para el periodo 2016-2019 dada en la Tabla 1 [6].

Tabla 1: Demanda de potencia y energía anual proyectada del SEIN (2016-2019)

Año	Máxima Demanda Potencia (MW)	Máxima Demanda Energía (GWh)
2016	6644,0	48369,0
2017	7087,0	51693,0
2018	7563,0	55329,0
2019	8039,0	58778,0

c) Situación actual del SEIN. La situación actual del SEIN esta representada por las características técnicas y económicas de las centrales hidráulicas y térmicas existentes al 2016. En la Tabla 2 se presenta las principales empresas hidráulicas generadoras de electricidad del SEIN, a diciembre de 2016 [6].

Tabla 2: Principales empresas de generación hidráulica del SEIN – 2016

Nro.	Nombre	Abreviatura
1	CERRO DEL AGUILA S.A,	CERRO DEL AGUILA
2	CHINANGO S.A.C	CHINANGO
3	COMPAÑÍA ELECTRICA EL PLATANAL S.A.	CELEPSA
4	DUKE ENERGY EGENOR S. EN C. POR A.	EGENOR
5	EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA AREQUIPA S.A.	EGASA
6	EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL SUR S.A.	EGESUR
7	EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MACHUPICCHU S.A.	EGEMSA
8	EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA SAN GABAN S.A.	SAN GABÁN
9	EMPRESA DE GENERACIÓN HUALLAGA S.A.	HUALLAGA
10	EMPRESA DE GENERACIÓN HUANZA S.A.	EGEHUANZA
11	EMPRESA ELÉCTRICIDAD DEL PERU S.A.	ELECTROPERU
12	ENEL GENERACION PERU S.A.A.	ENELPERU
13	ENGIE ENERGIA PERU	ENGIE
14	HIDROELECTRICA HUANCHOR S.A.C.	HUANCHOR
15	STATKRAFT PERU S.A.	STATKRAFT

d) Oferta de generación hidráulica y térmica comprometida y en proyecto. Para el planeamiento de la generación del SEIN, período 2016-2019, la oferta de generación hidráulica y térmica de potencia se muestra en la Tabla 3, que incluye los proyectos de generación hidráulica igual o menor a 20 MW como proyectos con Recursos Energéticos Renovables (RER), [6].

Tabla 3: Oferta de potencia de centrales hidroeléctricas y térmicas en proyecto del SEIN (2016-2019)

	Hidro (MW)			
Año	Proyecto Grande	Proyecto RER	Termico (MW)	Combustible
2016	456,00	190,00	635,70	Gas Natural
2017	34,90	-	-	-
2018	140,20	257,60	-	-
2019	-	23,30	-	-
Total	631,10	470,90	6635,70	

4. Resultados y discusión

4.1. Generación de series sintéticas de caudales medios mensuales en el SEIN

Teniendo en cuenta que son 23 cuencas hidrográficas las que se modelan en el modelo PERSEO, y que se debe determinar el modelo PARMA (p,q) más adecuado para la generación de series sintéticas de caudales mensuales en los 83 puntos de interés de estas cuencas, es que se ha toma la cuenca del río Mantaro, concesionada por ELECTROPERU S.A. como un caso de la aplicación de la metodología expuesta en los ítems 3.7 y 3.9, por ser la cuenca que produce el 30 % de la generación de energía y potencia del SEIN.

En la Figura 3 se presenta el Diagrama topológico de la cuenca del río Mantaro[6]. Se presentan los resultados principales para el punto de interés denominado embalse Lago Junin:

a) En la Tabla 4 se presentan los coeficientes AICC (coeficiente de Akique) obtenidos para diferentes modelos PARMA(p,q) aplicados a la series históricas de caudales mensuales naturales de ingreso al embalse Lago Junin. Los valores dados en la Tabla 4 indican que el modelo PARMA(1,1) es el de mejor ajuste para la generación de series sintéticas de caudales mensuales en el embalse Lago Junín, por tener los menores valores en los meses de avenidas (enero, febrero y marzo).

b) Con SAMS v.2009 y el modelo PARMA(1,1), se generaron 300 series sintéticas de caudales mensuales de igual periodo de información que la serie histórica de caudales de ingreso a Lago Junín.

c) Se elaboró la curva de duración dada en la Figura 4 de los caudales promedio multianuales de las 300 series sintéticas aplicando una distribución Weibull.

d) En la Figura 4 se observa que el caudal promedio multianual con una persistencia del 50 % es de 24,73 m^3/s, e identifica a la serie sintética esperada y corresponde a la serie sintética N° 231 generada con el modelo PARMA (1,1), cuyo resumen estadístico se muestra en la Tabla 5.

e) Se siguió el mismo procedimiento para determinar la serie sintética esperada en los 22 puntos de interés restantes de la cuenca del río Mantaro según la Figura 3, determinándose que el modelo PARMA(1,1) es el más adecuado para generar series de caudales mensuales en esta cuenca, como se puede ver en la Tabla 6.

4.2. Planeamiento de la expansión de la generación del SEIN (2016-2019)

a) Proyección de la Demanda Eléctrica (2016-2019). La proyección de la demanda de potencia para el período 2016-2019 corresponde a la obtenida en la Fijación Tarifaria de mayo 2017 [6], señalando que la demanda máxima de potencia es de 6.644 MW para el 2016; 7.087 MW para el 2017; 7.563 MW para el año 2018 y de 8.039 MW para el 2019, como se aprecia en la Figura 5.

b) Equipamiento de la expansión de la generación del SEIN. En la Tabla 7, se presenta el programa de equipamiento hidráulico y térmico de expansión del SEIN, donde se indican las nuevas centrales hidráulicas y térmicas a operar en el período 2016-2019, así como su potencia y fecha de entrada en operación.

c) Elaboración de los Archivos de datos de entrada del modelo PERSEO. Con las series

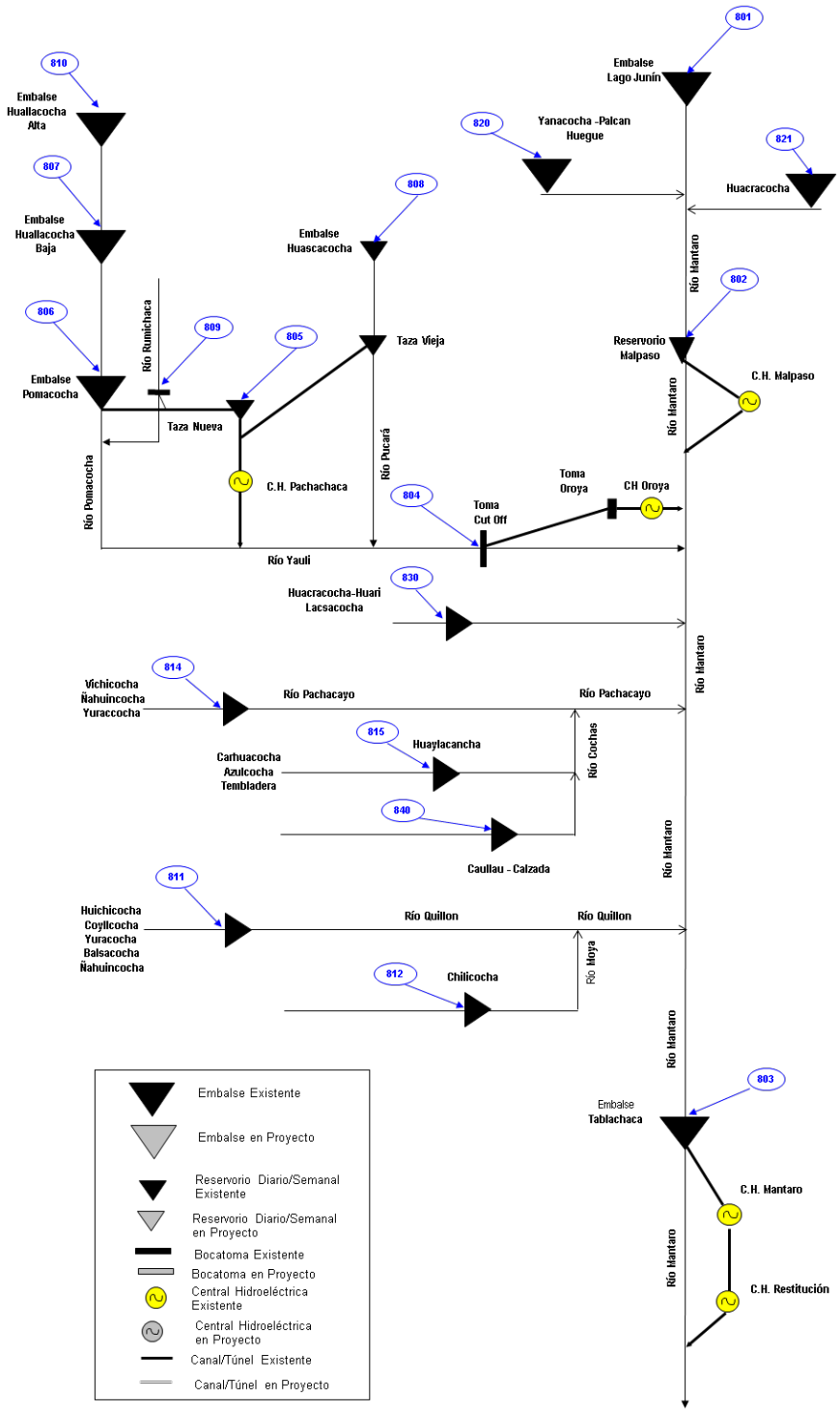


Figura 3: Diagrama topológico de la cuenca del río Mantaro [6]

histórica de caudales mensuales naturales de las cuencas hidrográficas, la proyección de demanda eléctrica para el escenario medio en el período 2016-2019, y la información técnica y económica indicada en el punto 3.9, se elaboraron los 20 archivos de datos de entrada del modelo PERSEO. Uno de estos archivos es el SEIN.hid que contiene las series históricas de caudales mensuales naturales afluentes a los 83 puntos de las cuencas hidrográficas del SEIN.

Tabla 4: Valores de AICC en avenidas para modelos PARMA (p,q) en Lago Junín

Parma	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
(1,0)	38,9	36,8	19,2	38,6	20,6	20	6,6	-32,9	-3	27,1	31,3	28,3
(1,1)	38	34,4	19,9	40,9	20,3	21,3	6,4	-31,4	-3,8	29,1	31,9	30,6
(1,2)	38,5	38,7	18,6	41,9	20,4	24,1	8,9	-29,2	-1,8	31,2	34,2	32,9
(1,3)	39,6	36,6	22,3	39,9	21,4	26,2	1,.3	-28,3	1,5	33,3	35,8	35,1
(2,0)	38	35,3	20,2	40,9	20,3	21,4	6,5	-31,3	-3,8	29,2	31,9	30,6
(2,1)	39,2	37,2	19,7	42,4	20,5	22,9	7,7	-29,1	-1,5	31,4	34,2	32,8
(2,2)	40,9	35,3	18,8	38,3	22,9	22,2	7,8	-27,2	0,5	32,4	36,2	34,2
(2,3)	41,8	39,5	24	38,6	20,8	27,8	5,6	-26,1	0,9	35,9	37,7	37,9
(3,0)	38,7	37,5	20,2	39,6	21,9	23,7	8,5	-29,1	-2	31,3	34,2	32,9
(3,1)	202,3	89,7	78,8	42,1	23,4	25,5	10,9	-27,7	-10	26,8	-15,7	-21,9
(3,2)	42,8	39,9	21,4	38,8	20,3	23,3	10,2	-28,1	-0,4	34,4	38,4	31,5
(3,3)	45,4	41,9	23,4	38,8	20,6	27,3	7	-24,3	3	38,2	41,3	38,5

Tabla 5: Serie sintética esperada de caudales mensuales de ingreso al Lago Junin - Serie sintética N° 231 (1965-2016)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	PROM
Prom	40,8	58,5	60,7	39,3	16,8	9,7	7,9	8,3	8,9	9,9	13,2	23	24,7
Dvest	21,4	34,5	21,2	20,2	9,6	4,1	3,5	4,5	4,3	3,3	9,6	19	7,3
Max	121,9	199,3	108,5	100,7	56,7	26	24	28,9	23,3	17,7	40,7	111,3	45
Min	5,2	7,7	12,7	3,8	4,7	2,2	2,3	2,6	2,1	2,5	3,1	2,3	11,1

Tabla 6: Puntos de interés de la cuenca río Mantaro y mejor modelo PARMA(p, q)

Serie	Puntos de Interes	Mejor modelo	Serie	Puntos de Interes	Mejor modelo
QN-801	Lago Junín	Parma(1,1)	QN-830	Estación Huari	Parma(1,1)
QN-802	Malpaso	Parma(1,1)	QN-840	Lags Calzada	Parma(1,1)
QN-803	Mantaro	Parma(1,1)	QN-901	Jaico + C.Colector	Parma(1,1)
QN-804	Cutoff	Parma(1,1)	QN-902	Altos Machay	Parma(1,1)
QN-805	Taza Vieja	Parma(1,1)	QN-903	Matacocha	Parma(1,1)
QN-806	Pomacocha	Parma(1,1)	QN-904	Incre Matacocha	Parma(1,1)
QN-807	Huallacocha Baja	Parma(1,1)	QN-905	Inc Huangush Alto	Parma(1,1)
QN-809	Rumichaca	Parma(1,1)	QN-906	Incre Huallamayo	Parma(1,1)
QN-810	Huallacocha Alta	Parma(1,1)	QN-907	Toma Manto	Parma(1,1)
QN-811	Lagunas (5) Quillón	Parma(1,1)	QN-908	Incre T. Uchuhuerta	Parma(1,1)
QN-812	Moya (Chilicocha)	Parma(1,1)	QN-909	IncreT. Huallamayo	Parma(1,1)
QN-814	Lag (3) Piñascocha	Parma(1,1)	QN-910	Laguna Victoria 1	Parma(1,1)
QN-815	Huaylacancha	Parma(1,1)	QN-911	Laguna Pacchapata	Parma(1,1)

4.3. Resultados del planeamiento de la generación del SEIN (2016-2019) – Cuenca del río Mantaro

Con el modelo PERSEO, se determina la política de optimización del planeamiento de expansión de generación de mínimo costo del SEIN. Esta expansión del sistema es técnicamente factible y garantiza el cubrimiento de la demanda eléctrica del período 2016-2019 con niveles adecuados de confiabilidad, calidad y seguridad. Se presentan los resultados más relevantes para la cuenca del río Mantaro, que actualmente está concesionada a ELECTROPERU S.A.

a) Resultados de costos marginales actualizados (CMA) en la Barra Mantaro.

   En la Figura 6 se presenta la evolución del costo marginal actualizado (CMA) en la

Tabla 7: Programa de equipamiento del SEIN, periodo 2016-2019

Fecha de Ingreso	Nombre del Proyecto	Potencia (MW)	Fecha de Ingreso	Nombre del Proyecto	Potencia (MW)
oct-16	CH Chaglla	456	jul-18	CH Marañon	18,4
dic-16	CH 8 de Agosto	19	jul-18	CH Karpa	19
oct-16	CT Chilca 1 CS	35,7	jul-18	CH Hydrika 5	10
nov-16	CT Ilo-Nodo Sur	600	jul-18	CH Hydrika 2	4
abr-17	CH Potrero	19,9	ago-18	CH Huatziroki	11,1
dic-17	CH Yarucaya	15	nov-18	CH Hydrika 3	10
ene-18	CH La Virgen	84	oct-18	CH Hydrika 4	8
ene-18	CH Angel I-II	40	nov-18	CH Carhuac	20
ene-18	CH Angel III	20	nov-18	CH Hydrika 1	6,6
ene-18	CH Santa Lorenza	18,7	dic-18	CH Lag. Azul	20
feb-18	CH Renovantes	20	dic-18	CH Colca	12,1
mar-18	CH Tulumayo IV	56,2	ene-19	CH Zaña	13,2
abr-18	CH Manta	19,8	jun-19	CH Pallca	10,1

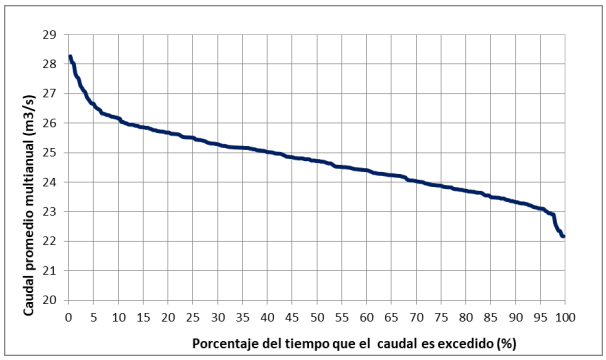


Figura 4: Curva de duración de caudales promedio multianuales de 300 series sintéticas generadas de ingreso al Lago Junin

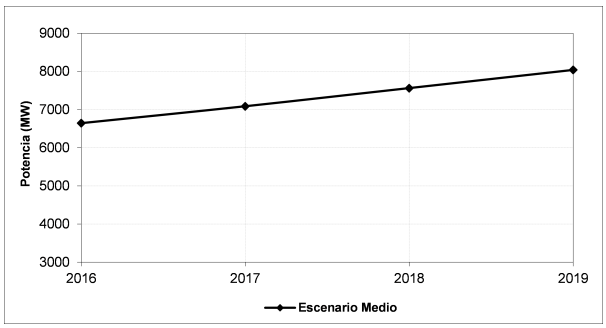


Figura 5: Proyección de la demanda de potencia del SEIN (2016-2019)

Barra Mantaro (2016-2019), el promedio de los CMA es del orden de 27,50 US$/MWh usando series históricas de caudales y de 25,80 US$/MWh usando series sintéticas de caudales mensuales, habiendo una diferencia promedio de 1,70 US$/MWh. Para los años 2016, 2017, 2018 y 2019 la diferencia en promedio es menor que 1,75, 1,72, 1,68 y 1,66 US$/MWh respectivamente.

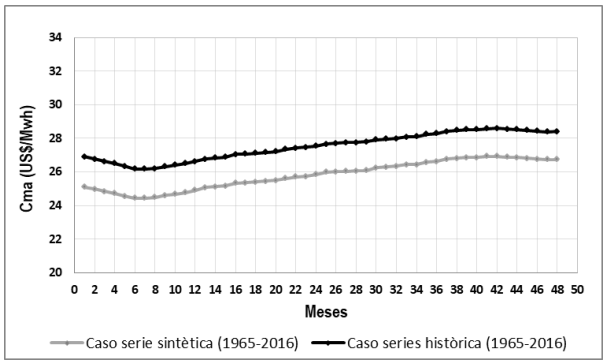


Figura 6: Costos marginales actualizados en la Barra Mantaro (2016-2019)

b) Resultados del volumen útil almacenado (VUA) en el embalse Lago Junín.

En la Figura 7 se presenta el VUA en el Lago Junín en el periodo 2016-2019, usando series históricas y sintéticas de caudales mensuales en las cuencas hidrográficas del SEIN. Teniendo para el primer caso un valor promedio anual es 125,60, 92,80, 96,63, 163,63 MMC en los años 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente. Para el segundo caso, se tiene valores promedio anuales de 129,33,

135,96, 148,49 y 165,45 MMC, respectivamente. De acuerdo con estos resultados se tiene un aumento promedio de 3,73, 43,16, 51,86 y 1,82 MMC, respectivamente. El valor promedio del VUA para el periodo 2016–2019 es de 119,67 y 144,91 MMC, para la serie histórica y sintética, lo que indica un incremento promedio del orden de 25,24 MMC.

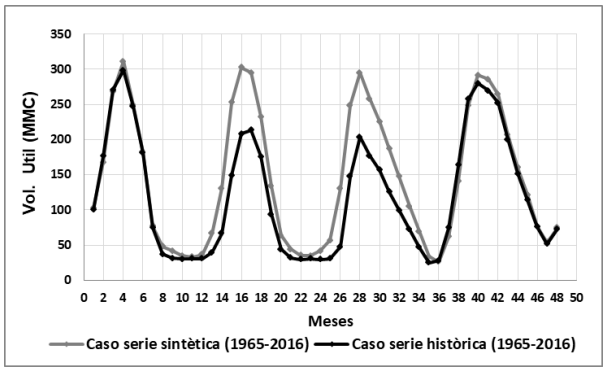


Figura 7: Volumen útil almacenado en Lago Junín (2016-2019)

c) Resultados de la energía mensual generada (EMG) en las centrales hidroeléctricas Mantaro y Restitución.

   En la Figura 8, el total de EMG en la C.H. Mantaro y C.H. Restitución, en el periodo 2016–2019, usando series históricas y series sintéticas de caudales mensuales en las cuencas hidrográficas del SEIN, es de 25842,77 y 26176,88 GWh respectivamente, ocurriendo un incremento total de 334,11 GWh.

d) Resultados del ingreso neto por venta de energía generada (IVEG) en las centrales hidroeléctricas Mantaro y Restitución.

   Para ELECTROPERU S.A., el total del IVEG en la C.H. Mantaro y C.H. restitución en el periodo 2016-2019, usando series históricas y series sintéticas de caudales mensuales en el SEIN, es de 624,03 y 592,26 millones US$, respectivamente, produciéndose una

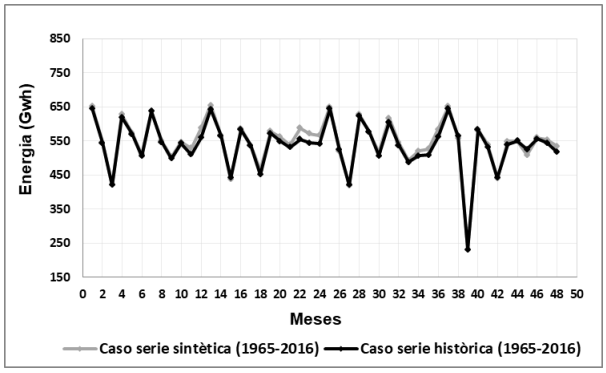


Figura 8: Energía mensual total generada en C.H. Mantaro y C.H. Restitución (2016-2019)

disminución del orden de los 31,78 millones US$. En la Figura 9, se puede observar la evolución en el tiempo del IVEG de las centrales Mantaro y Restitución para periodo 2016–2019.

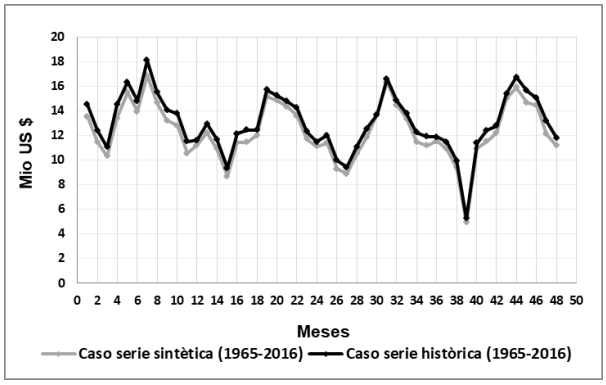


Figura 9: Ingreso neto por venta de energía C.H. Mantaro y C.H. Restitución (2016-2019)

5. Conclusiones

Se concluye que las series hidrológicas tienen un impacto significativo en la obtención del costo marginal del SEIN con el modelo PERSEO en el período 2016-2019. Las series hidrológicas usadas en la actualidad resultan en valores de costo marginal más altos que los que se obtendría utilizando series sintéticas hidrológicas obtenidas con el modelo autorregresivo de medias móviles periódico PARMA(1,1), determinado como el mejor modelo para la generación de series

sintéticas de caudales mensuales en las 23 cuencas hidrográficas del SEIN.

Los resultados de la investigación presentados para la cuenca del rio Mantaro, escogida por ser la que actualmente produce el 32 % de la energía generada en el SEIN, muestran una diferencia en el valor del costo marginal de energía de 1,70 US$/MWh, lo que implica una significativa variación en términos de ingresos para la empresa ELECTROPERU S.A. concesionaria de esta cuenca.

6. Recomendaciones

Se recomienda a OSINERGMIN que para los próximos estudios de planeamiento de la operación del SEIN dentro del estudio técnico económico de determinación de precios de potencia y energía en barras para las fijaciones tarifarias que anualmente se realizan se considere un escenario que contemple el uso de series sintéticas de caudales mensuales para las cuencas hidrográficas involucradas en el análisis.

7. Referencias

[1] J. E. Guevara Bello, C. E. Vega González, y E. Guevara Pérez, "Análisis estocástico de una serie cronológica de caudales mensuales. Caso de estudio: Río Coroní, Venezuela," *Revista Ingeniería UC*, vol. 17, no. 1, pp. 46–54, 2010.

[2] A. M. Díaz Salas y E. Guevara, "Modelación estocástica de los caudales medios anuales en la cuenca del río Santa, Perú," *Revista Ingeniería UC*, vol. 23, no. 2, pp. 172–185, 2016.

[3] E. S. Palacios Galindo, "Modelo para el manejo de la incertidumbre hidrológica en la planificación de la operación del SIC," Trabajo especial de grado de Maestría, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Eléctrica, UCH, 2004.

[4] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), "Desarrollo de Modelos para Pronósticos Hidrológicos y de Demanda," Perú, Reporte técnico, Mar. 2009.

[5] D. Sarango y T. Velásquez, "Uso de Series Sintéticas de Caudales medios mensuales en el Cálculo del Costo Marginal de Energía del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del Perú," *Revista de Investigación de Física*, vol. 12, no. 1, pp. 59–69, 2009.

[6] Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional, PE, "Estudio Técnico Económico de Determinación de Precios de Potencia y Energía en Barras para la Fijación Tarifaría Período Mayo 2017 - Abril 2018," Perú, Reporte técnico, 2017.

[7] J. Sánchez y M. Sánchez, "Generación de series sintéticas mensuales del río Chira mediante el uso de modelos markovianos," *Anales Científicos*, vol. 70, no. 2, pp. 190–195, 2009.

[8] E. Minder, "Modelación Hidrológica y su Efecto en los Precios Spot," en *VIII Congreso Latinoamericano de control automático y XIII Congreso de la Asociación chilena de control automático*, 1998, pp. 139–145.

[9] J. Moreno Cadavid y J. E. Salazar, "Generación de series sintéticas de caudales usando un Modelo matalas con medias condicionadas," *Avances en recursos hidráulicos*, no. 17, pp. 17–24, 2008.

[10] E. Custodio y M. R. Llamas, *Hidrología subterránea*. Barcelona, España: Omega, 2001, vol. 1.

[11] R. S. Pindyck, D. L. Rubinfeld, y J. A. Velázquez Arellano, *Econometría: modelos y pronósticos*. México: McGraw–Hill, 2001.

[12] J. Hernández-Alonso, *Análisis de series temporales económicas I*. Madrid: ESIC Editorial, 2009.

[13] D. N. Gujarati y D. C. Porter, *Econometría*, 5ta ed. McGraw-Hill Interamericana, 2010.

[14] D. Peña-Sánchez de Rivera, *Análisis de series temporales*. Madrid: Alianza Editorial, 2005.

[15] E. Court-Monteverde y E.-W. Rengifo, *Estadísticas y Econometría Financiera*, 1st ed. Buenos Aires: Cengage Learning, 2011.

[16] O. G. Sveinsson, J. D. Salas, a. W. L. Lane, and D. K. Frevert, *Stochastic analysis, modeling, and simulation (SAMS) version 2007, user´s manual*. Fort Collins, Colorado: . Computing Hydrology Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, 2007.

[17] D. R. Maidment, *Handbook of applied hydrology*. New York: McGrawHill Book Company, 1993.

[18] M. P. González Casimiro, "Economía aplicada iii/ekonomia aplikatua iii, upv/ehu," en *Análisis de series temporales:Modelos ARIMA*. Bizkaia, España: SARRIKOON, 2009, vol. 04–09.

[19] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), Gerencia adjunta de regulación tarifaria (GART), *Metodología del modelo PERSEO*, 2006.

Improvement of Shared Awareness in Sensor Grid in Three Levels of CommonKADS Framework

Sedighe Bakhtiari , Mehdi N. Fesharaki * , Ahmad Khadem-zadeh

Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University. Tehran, Iran.

Abstract.- Given the need for real-time information and data as well as distributed computing, large-scale sensor grid is a great option to make more precise decisions in management and control of large-scale organizations and environments. For this purpose, it makes sense for integration of the two technologies of sensor networks and grid computing which was done here based on Observation, Orientation, Decision, Action (OODA) intelligent architecture and Elementary Loop of Function (ELF) decision making models. To this end, the simulations were conducted based on CoomonKADS framework at three levels including simplicity, composition and analysis. The results of the simulation indicate that as the number of network elements (resources and users) increases, namely, the large scale performance, the level of shared awareness significantly increases. As the acquired data and knowledge are either stored or retrieved from other sources and given the large-scale resources' life reduction, the findings also show that shared awareness will not be significantly decreased with reduced resource life at a very large scale. The great note about the results is that the best mode of shared awareness is obtained when we have the highest scale of users and resources.

Keywords: sensor networks; grid computing; OODA; ELF; CommonKADS.

Mejora del conocimiento compartido en malla de sensores en tres niveles del framework CommonKADS

Resumen.- Dada la necesidad actual, en la gestión y el control de grandes organizaciones, de información y datos en tiempo real, así como también de computación distribuida, una red de sensores a gran escala es una gran opción para la toma de decisiones precisas. Para ello, tiene sentido para la integración de las dos tecnologías de redes de sensores y computación en red que se hizo aquí sobre la base de la observación, orientación, decisión, acción (OODA) arquitectura inteligente y bucle elemental de la función (ELF) modelos de toma de decisiones. Con este fin, las simulaciones se llevaron a cabo sobre la base del marco CoomonKADS en tres niveles, incluyendo simplicidad, composición y análisis. Los resultados de la simulación indican que a medida que aumenta el número de elementos de red (recursos y usuarios), a saber, el rendimiento a gran escala, el nivel de conciencia compartida aumenta significativamente. Dado que los datos y los conocimientos adquiridos se almacenan o recuperan de otras fuentes y se les da la reducción de la vida útil de los recursos a gran escala, los resultados también muestran que la conciencia compartida no se reducirá significativamente con una vida útil de los recursos reducida a gran escala. La gran nota sobre los resultados es que el mejor modo de conciencia compartida se obtiene cuando tenemos la mayor escala de usuarios y recursos.

Palabras clave: sensor networks; grid computing; OODA; ELF; CommonKADS.

Received: January 06, 2020.
Accepted: February 25, 2020.

1. Introduction

In today's age, the need for real-time information and data as well as distributed computing is deeply felt to make more precise decisions in management and control of large-scale organizations and environments. The large-scale sensor grid creates this capability [1]. Such a sensor grid network is composed of several wireless sensor nodes. Generally, the mentioned sensor nodes own restricted resources and computing power. As a result, the computational tasks which are resource demanding and/or computationally intensive need to be partially or mostly offloaded to a place other

* Correspondence author:
*e-mail:*fesharaki@mut.ac.ir (M. Fesharaki)

than the sensor devices for prompt processing. In addition, the data collected or created by these sensor devices have to be transferred over the sensor grid network [2]. Besides, the four characteristics including distribution, decentralization, diversification and change are key features of large-scale organizations. In the framework of large-scale sensor grid, the purpose of such an infrastructure is to give freedom to any user in any functional area to create a true sense of the environment and thus to utilize the experience and results to control the environment more effectively. Challenges in this area often include the development of conceptual models for two-way information exchange, software platforms that support these new communication processes in a technology-independent way, and ways to ensure security, trust and efficiency in data exchange [3]. The Large Scale Sensor Grid is a dynamic repository for generating and storing information to produce intelligent outputs for various organizations. The Large-Scale Sensor Grid is a system that is accessible to various organizations and institutions and can be developed to meet the needs of organizations. The overall goal is to build a system that is useful for different applications and organizations with different processes, expandable over time, and can be used as a platform for receiving information and knowledge in an updated and integrated way. The large-scale sensor grid is designed to allow easy collaboration between sensors' data sources from different applications, storage and processing repositories [4]. Any application by the user proxy interface can adapt the system to meet its specific needs and manage the processes. In fact, proxies in three parts can handle the complex problem of how to modify the different workflows needed for multipurpose systems. In addition, a number of services and requirements for interoperability and exchange of information, facilities for communication and interactions between information sources and capabilities, are needed as infrastructure to meet the sensor grade communication and information needs by the sensor grid (Figure 1). In other words, the Grid has knowledge of services about how information is sent, by whom, and with what restrictions [5].

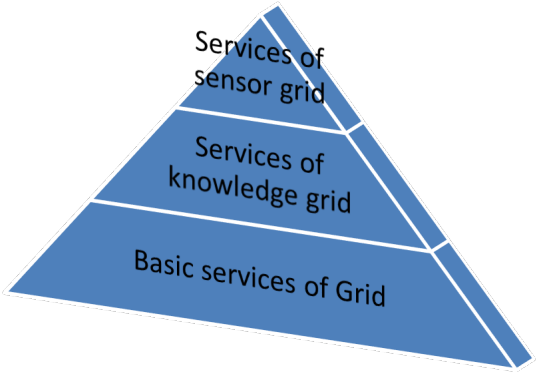


Figure 1: The relationship between services of sensor grid with other services

To this end, some similar studies have been conducted for integration of sensor networks and grid computing. For instance, the Sensor Grid Project of Singapore International University aims to utilize the computing power, storage, and grid connectivity bandwidth to support sensors with limited resources. They practitioners in this project try to have data mining and decision making in real time, and recently they have claimed that their architecture based on web-based connections between sensor networks and grid computing (based on the Globus Toolkit4) is capable of delivering distributed data mining. Similarly, the Sensor Grid project at the University of India also seeks to create a grid of grids based on the integration of web service technology into a Service Oriented Architecture (SOA), while their middleware is based on such brokers as Narada Brokering (Sensor Grid in University of Indiana, http://www.crisisgrid.org/html/introduction.html) [6].

In present study, using CommonKADS framework, sensor networks and grid computing were integrated based on Observation Orientation Decision Action (OODA) smart decision making models and Elementary Loop of Function (ELF) smart structure architectures. In a smart system, computational loops are constantly repeated from sensor to action, from global model to sensor processing, and from behavior generation to global

model to quantitative evaluation. These loops are repeated long enough to meet the target threshold based on the variety of sensor and action capability [7]. One of the benefits of interacting with sensor elements is improving shared awareness and thus providing a better mental model for different organizations. Being aware of what is happening in the surroundings is a matter of Shared Situation Awareness. Team members must gather and aggregate all input data from different systems, external environments, peers and others in order to gain Shared Situation Awareness. This holistic image organizes a central feature that fits into all decisions and actions [8]. Therefore, Shared Situation Awareness is referred to as the overlaps of team member's situational awareness requirements, as shown in Figure 2.

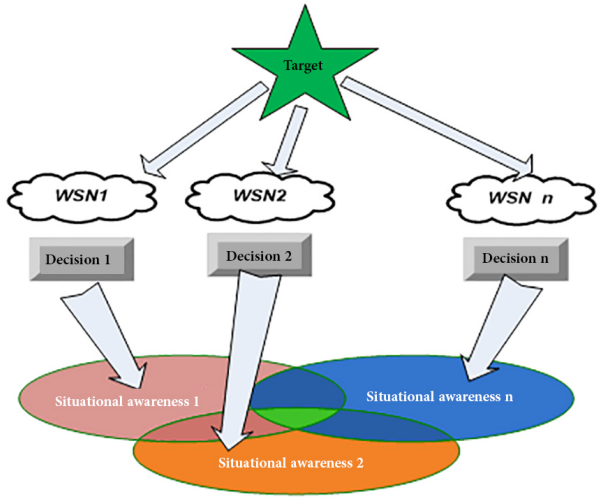


Figure 2: Shared Situation Awareness

As a result, to obtain shared situation awareness, the mental model is effective in attaining reality and situational awareness brings the mental models closer to reality. The shared awareness gained from the interaction between the sensor grid elements has a significant impact on efficient decision making in different organizations [9]. Accordingly OODA and ELF are discussed briefly as follows:

2. Observation Orientation Decision Action (OODA)

The Boyd's Control Cycle or OODA was introduced in 1987 and is actually a cyclic model with four stages including observation, orientation, decision, and action. This cycle was originally developed for military command and for aerial warfare, which was used as a closed loop for understanding human-machine interaction in command and control systems. In other words, this model was introduced to represent decision-support mechanisms for the military systems of that time, and since decision-support systems were using information merging, it was also widely used in data integration. This model is process-oriented and information-based and outlines the overall tasks of a data gathering system. At the observation stage, the sensor data is collected. In the orientation of the data, they are combined to understand the situation. In the decision phase, a plan is provided for responding and finally, the provided plan is implemented in the action phase [10]. Figure 3 depicts this control cycle where arrows indicate the amount of data flow in the loop. Extent to which the data in the loop is refined and transformed into information, the amount of data transferred to the next phase decreases. The advantage of this model is that it is closed loop and acts on its environment and sensors [11].

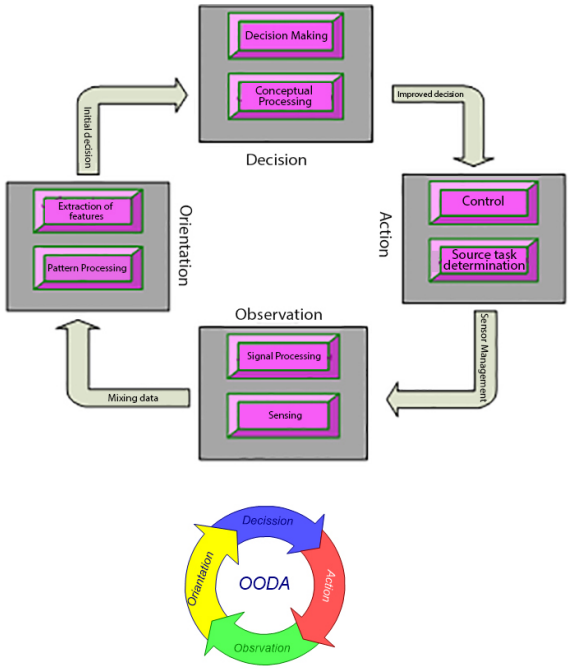


Figure 3: Boyd's Circle (OODA)

In the OODA model, shared awareness is

equivalent to observation and orientation, and we will exit the loop if no shared awareness exists. Therefore, with the proper Shared Situation Awareness, decision making will become faster and entities and teams perform more efficient operations in the environment.

3. Elementary Loop of Functioning (ELF)

An architectural reference model is required to design and engineer smart/intelligent systems. In other words, with the reference model, it is possible to develop engineering models for the design and construction of intelligent systems. Using the Elementary Loop of Functioning (ELF) reference architecture, some guidelines are provided for designing and constructing a Shared Situation Awareness that can perform the tasks similar to natural intelligent systems. The ELF model's approach to the phenomenon of intelligence is a computationally, namely, a system is intelligent if it has these four basic processes: sensory processing, global modeling, evaluating and producing behavior. This model, which is a computational loop with hierarchical resolution, appears in various phenomena such as behavior, perception, cognition, emotion, problem solving, and learning. This model can be used to help formalizing and designing intelligent systems, and providing a framework for implementation of engineering systems [12]. The ELF model's processes specify how to process sensor's data, build, maintain and use knowledge bases, select targets, respond to sensor inputs, and control actions. The sensor processing trend has functions which are in charge of attention, identifying and grouping features, calculating traits, comparing observations to expectations, identifying objects and events, and analyzing status [13]. Figure 4 illustrates the process ELF model.

The process of global modeling constructs and maintains events, entities, relationships and situations. This process also provides forecasts, expectations, beliefs and estimates of possible future actions. Therefore, by storing perceptions and behaviors planned in the global model, learning is shaped here. The process of evaluating the

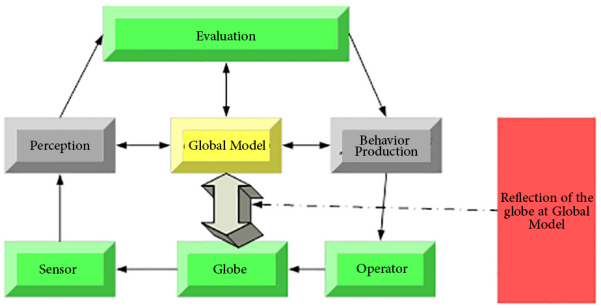


Figure 4: Elementary Loop of Functioning (ELF)

cost, benefits, risks, and expectations of the plan in question is implemented and attributed to the objects, events, and situations achieved in this model. In other words, the process determines the importance, reward or punishment, and the degree of certainty of what is provided in the global model. Finally, the production process selects the behavior of the targets and breaks down the tasks into smaller sections. It also generates plans to achieve the target, coordinating the activities required and ultimately controlling the actions. The link between the processes described is such that a control loop is provided with computational feedback[13].

4. Integration Based on OODA and ELF

As mentioned above, the right mental model is one of the key needs in achieving Shared Situation Awareness and ultimately making the right decisions. The mental model is a set of dynamic knowledge structures that have been well-organized and well-established over time. The large amount of data contained in the sensor should not diminish user's decision-making ability. In presenting the large scale sensor grid framework, the basis of the overall performance of the layers is based on the OODA intelligent decision-making model. The performance of the core layer or functional core of the sensor grid, which actually provides the correct mental model, is based on the ELF intelligent system architecture [14].

The overall functioning of the OODA-based large-scale sensor grid is shown in Figure 5. The observation phase is performed by the services provided in the proxy layer of sensor network.

Then, in the grid proxy, with the orientation made based on current data and prior knowledge, the most appropriate decision is made and sent to the user as a result. The resulting shared awareness is equivalent to the observation and orientation phases, and we will get out of the loop in the event of having no awareness. Therefore, with the appropriate Shared Situation Awareness, decision making will be done faster and entities and teams perform more efficient operations in the environment.

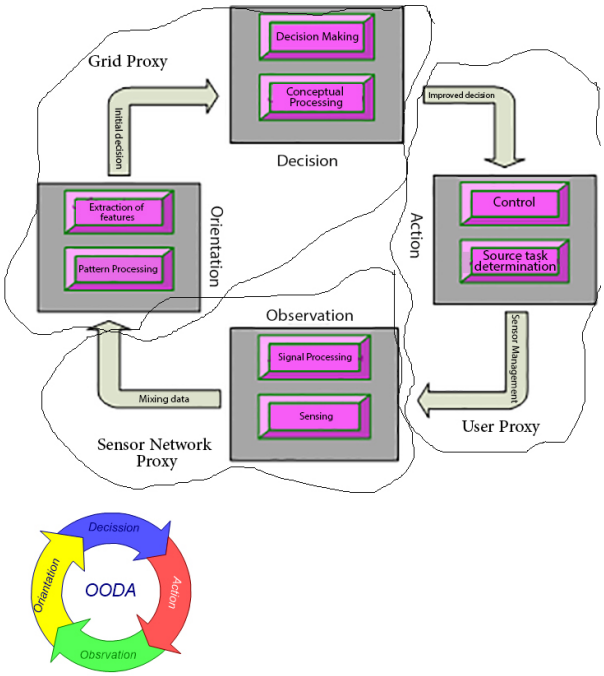


Figure 5: Overall functioning of the OODA-based large-scale sensor grid

In the intelligent system, computational loops from sensor to action, from global model to sensor processing, and from behavior generation to global model to quantitative evaluation, are constantly repeated. These loops are repeated long enough to meet the target threshold based on the variety of sensor and action capability. In other words, repeating ends when the information units in all subsystems reach a consensus on entities, events, and situations, and also the final targets are broken down into specific targets in order to create the command. Figure 6 shows the functioning of the Grid layer and how to achieve shared awareness based on the global model. In the inner circle, the sensed results are compared according to the final targets and the plans will be regularized. Then control is then applied to the globe to provide plans-related results. In fact, intelligence in this model is provided by the interaction between top-down targets and bottom-up sensor feedback. There is also an internal link between sensor processing and the globe modeling, which provides predictions for comparison with sensor observations. In this loop, filtering is performed depending on recursive form of estimation. There is also a link between the processes of generating behavior, evaluating and modeling the globe that simulates and assesses the preliminary plans in the internal planning loop before selecting and executing the design.

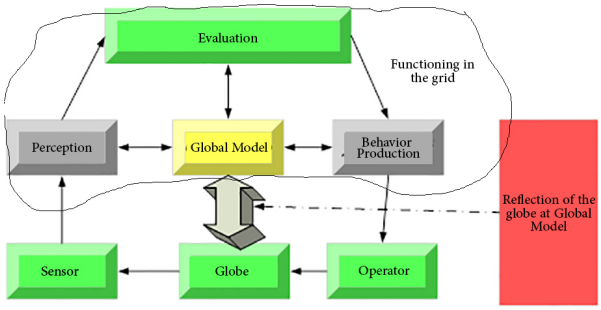


Figure 6: Functioning of grid layer based on ELF reference model

Computational loops hierarchically and repeatedly lead to deeper phenomena such as behavior, perception, cognition, emotion, problem solving, and learning. All the subsystems providing entities, events, and situations, as well as subsystems that break down the targets into sub-targets and prepare action commands, exchange the provided information units at each level and between levels. In each loop, the process of globe modeling maintains the knowledge with specification of a knowledge domain and the degree of knowledge dissociation.

5. Simulation

The CommonKADS (Knowledge Acquisition Design System) model was used to simulate the performance of shared awareness derived from the large-scale sensor grid system. This model is one

of the models proposed to analyze the knowledge required of such environments. Inspired by this model, a three-tower approach with three levels of analysis, composition, and simplicity is used to design shared awareness in sensor grids. This model answers three basic questions of why, what and how. The analysis level answers why questions such as existing system capabilities to solve problems, usefulness and impact on the organization based on existing cognitive theories. In fact, understanding the environment at the analysis level answers the question of why. In order to respond the question what, the composition level answers the used knowledge structure and the needed communications. Finally, for answering the how question, the simplicity level determines the implementation of computational mechanisms by presenting a methodology [15]. Figure 7 presents the conceptual framework of CoomonKADS and simulation approach of shared awareness of sensor grid.

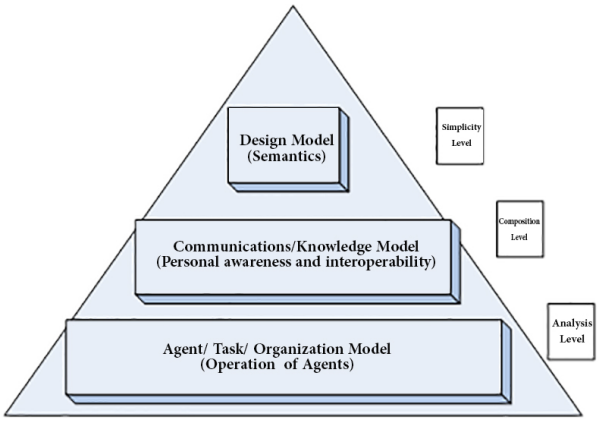


Figure 7: Conceptual framework of CoomonKADS and simulation approach of shared awareness of sensor grid

In fact, some set of threshold values should normally be defined as the necessary condition for collaboration among members to achieve shared awareness in network-centric organizations as determined by the system architect. In other words, achieving shared awareness has been formed based on individual awareness in different organizations as the result of planning and interaction and collaboration between knowledge-based agents in the environment, leading to shared awareness and improved decision making. Figure 8 depicts the way of behavior production in sensor grid based on shared awareness.

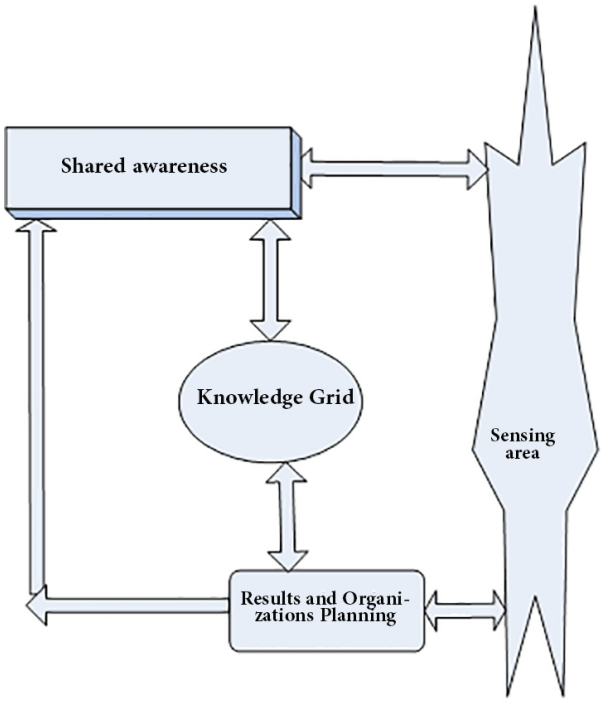


Figure 8: The way of behavior production in sensor grid based on shared awareness

For the simulation, the software Netlogo was used to simulate complex time-varying systems. In this platform, many independent agents can be implemented. In this platform and model, information exchange between resources in the environment was simulated to measure the level of awareness (Figure 9).

According to exchange between people and resources, the increased level of awareness created at a certain threshold was considered as a source of new knowledge. In addition, a level of awareness was identified randomly and the information centers were considered as any suitable information source available. In the initial simulation, each person has a level of awareness that is considered as an awareness point, and we considered a classification based on these scores:

1. 0-5 points: unaware
2. 5-10 points: aware
3. 10-15 points: well-informed

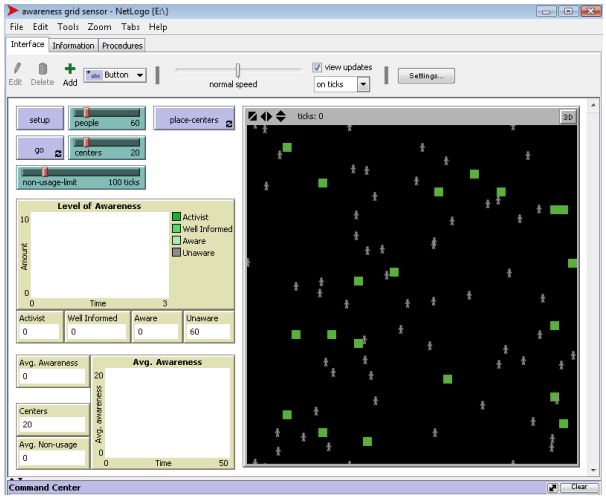


Figure 9: An overview of simulation of sensor-grid's shared awareness in Netlogo Platform

4. Above 15 points: activist

Accordingly, an overview of user's shared awareness is depicted in Figure 10.

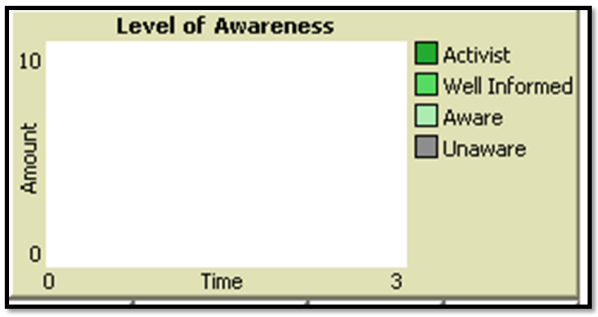


Figure 10: An overview of user's shared awareness

In the environment, the subject sends his request to the source if it receives the correct answer, he will earn 5 points. If he does not receive a response within a specified time, a point will be lowered. (Minimum level of awareness here is set at zero and maximum of 15). If the score level is higher than 15 it is added as a new central knowledge. Given the limited life of sensor resources, we considered the usage limit as data reception source, which can be varied according to different threshold conditions, but it will be terminated at the source level if it is lower than the minimum usage limitation level. The purpose of this simulation was to show the impact of expanding and increasing the number of resources on the level of user's awareness, which is the most important issue in decision making. The criteria to be evaluated were:

1. Number of users: number of participating agents.

2. Number of data resource centers: there is a certain initial amount of resources that, depending on the circumstances, can be increased by the amount of knowledge that can be gained through appropriate interactions and collaboration between network members, resulting in increased resources in simulation. It is intended and, in the event of inadequate collaboration between members, merely reduces the life of the centers, which, in the light of the minimum intended amount for the life of the resources, will eventually be eliminated.

3. Mean awareness level: achievement of a certain amount of awareness between users according to the time.

4. Resources life limit: a time-based threshold level for the resource life length.

At this stage, with the number of users up to 100 and the number of resources by 5 (low), 10 and 20 (moderate) and 40 (high), and the resource life limit of 100/50 ticks, the level of shared awareness among users on the network was examined. An overview of simulated resources and users can be seen in Figure 11.

The results of simulation in diverse modes are presented in Table 1.

Table 1: Comparison of simulation results

Resources	Mean shared awareness		
	[A]	[B]	[C]
5	0	0,055	0
10	0,17	0,225	0,1
20	6,66	13,95	0,25
40	14,97	15	14,94

[A]:number of users=100, resource life limit=100 ticks
[B]:number of users=200, resource life limit=100 ticks
[C]:number of users=100, resource life limit=50 ticks

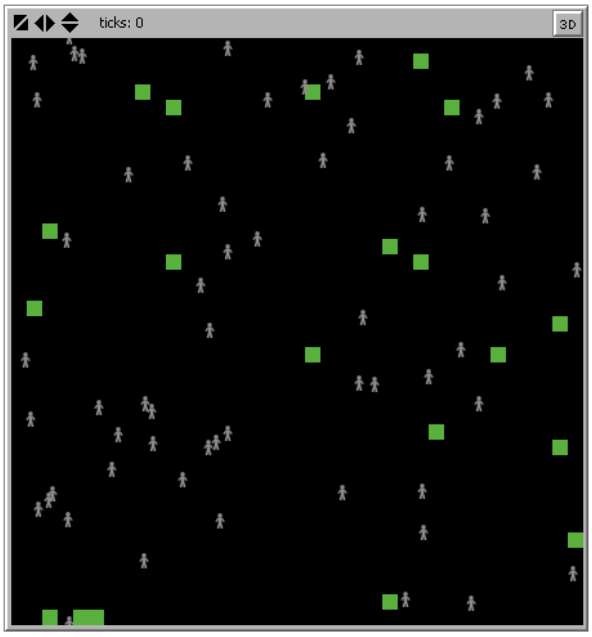


Figure 11: An overview of simulated users and resources

6. Conclusion

The integration of the two technologies of sensor networks and grid computing has many challenges, and much of the effort and research related to middleware, protocols, and network connections have been/will be made. Sensor Grid management must be implemented actively, dynamically, and distributed to enhance consistency and error tolerance. At all outlined frameworks, the challenges of management, security and accessibility mechanisms have been addressed with different perspectives and approaches, and these challenges must be responded through a technology utilizing social and cognitive interactions. By examining the various sensor grid frameworks, we will come to the conclusion that in these architectures the grid is considered as a social network where individuals, machines, and virtual roles are interconnected. In addition, other management systems in the grid, not even referred to as the knowledge grid, are considered as a knowledge-based grid with which the sensor grid interacts. As a result, the Knowledge Grid can be considered a social network that serves as the infrastructure for the Sensor Grid to meet the confidence and commitment for receiving and distributing data. Given the mentioned above explanations, present study integrated sensor networks and grid computing based on OODA intelligent architecture and ELF decision making models. To this end, the simulations were conducted based on CoomonKADS framework at three levels including simplicity, composition and analysis. The results of the simulation indicate that as the number of network elements (resources and users) increases, namely, the large scale performance, the level of shared awareness significantly increases. As the acquired data and knowledge are either stored or retrieved from other sources and given the large-scale resource's life reduction, the findings also show that shared awareness will not be significantly decreased with reduced resource life at a very large scale. The great note about the results is that the best mode of shared awareness is obtained when we have the highest scale of users and resources.

7. References

[1] Q. Fan, N. Xiong, K. Zeitouni, Q. Wu, A. V. Vasilakos, and Y.-C. Tian, "Game balanced multi-factor multicast routing in sensor grid networks," *Information Sciences*, vol. 367-368, pp. 550–572, 2016.

[2] J. Shen, H. Tan, J. Wan, J. Wan, and S. Lee, "A novel routing protocol providing good transmission reliability in underwater sensor networks," *Journal of Internet Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 169–176, 2015.

[3] M. Gribaudo, C. F. Chiasserini, R. Gaeta, M. Garetto, D. Manini, and M. Sereno, "A spatial fluid-based framework to analyze large-scale wireless sensor networks," in *2005 International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'05)*, 2005, pp. 694–703.

[4] S. Bakhtiari, M. Fesharaki, and A. Khadem-zadeh, "Large-Scale Sensor Grid Based on Knowledge Grid," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 13, no. 1, pp. 306–313, January 2016.

[5] H. B. Lim, Y. M. Teo, P. Mukherjee, V. T. Lam, W. F. Wong, and S. See, "Sensor Grid: Integration Of Wireless Sensor Networks and the Grid," in *Proceedings of the The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary*, ser. LCN '05. USA: IEEE Computer Society, 2005, p. 91–99.

[6] C. K. Tham and R. Buyya, "SensorGrid: integrating sensor networks and grid computing," in *Invited Paper in CSI Communications, Special Issue on Grid Computing, Computer Society of India*, 2005.

[7] B. Kent, "Observe, Orient, Decide, Act: A Subjectivist Model of Entrepreneurial Decision Making," *Journal of Manegerial Issues*, vol. 30, no. 3, 2018.

[8] E. Dorion and S. Fortin, "Multi-source semantic integration - revisiting the theory of signs and ontology alignment principles," in *2007 10th International Conference on Information Fusion*, 2007, pp. 1–6.

[9] M. Scheutz, S. A. DeLoach, and J. A. Adams, "A Framework for Developing and Using Shared Mental Models in Human-Agent Teams," *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, vol. 11, no. 3, pp. 203–224, 2017.

[10] E. Shahbazian, D. E. Blodgett, and P. Labbé, "The Extended OODA Model for Data Fusion Systems," in *4th International Conference on Information Fusion*, Montreal, Canada, August 2001.

[11] A. Omarova, V. Ireland, and A. Gorod, "An Alternative Approach to Identifying and Appraising Adaptive Loops in Complex Organizations," in *Procedia Computer Science*, ser. Complex Adaptive Systems, Conference Organized by Missouri University of Science and Technology 2012, C. H. Dagli, Ed., vol. 12, Washington D.C., December 2012, p. 56–62.

[12] A. Meystel and J. Albus, *Intelligent Systems: Architecture, design and Control*. New York: Wiley, 2001.

[13] W. Van Wezel, R. Jorna, and A. Meystel, *Planning in intelligent systems: aspects, motivations, and methods*. New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

[14] M. Révay and M. Líška, "OODA loop in command control systems," in *2017 Communication and Information Technologies (KIT)*, 2017, pp. 1–4.

[15] G. Schreiber, H. Akkermans, A. Anjewierden, R. Hoog, N. Shadbolt, W. Van de Velde, and B. Wielinga, *Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology*. The MIT Press, 2000.

LaTeX in academic activities in the Mathematic Department of the Engineering Faculty

Yanitza Román *,[a,b], Joan Ordoñez [a,b], Jesús J. Jiménez G. [a,b]

[a]*Departamento de Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*
[b]*Instituto de Matemática (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*

Abstract.- The education of the new times establishes the imperative need to rethink strategies in traditional education. Within the framework of the key competences in lifelong learning, it is essential to guarantee equality to adapt to the needs of society. Competence refers to being competent, that is, knowing how to do, hence the use of ICT is incorporated into digital competence, the Latex word processor being a tool with potential benefit in scientific environments on the typographical aspect of a document. The Faculty of Engineering has proposed to increase the publication of research, so an individual with better training will produce better results, introducing the use of Latex in all stages of training and starting in the early stages. Specifically in the area of mathematics, it is closely related to the diversity of symbols used in engineering sciences. In addition to the low performance in the students of the Department of Mathematics of the Faculty of Engineering for different factors, it drives us to make the strategic proposal of the use of the word processor Latex in academic activities of both students and teachers to provide a competition that helps Improve academic performance. Latex as a teaching resource facilitates the process of writing ordinary and mathematical text with an emphasis on mathematical symbology, which at the same time benefits mathematical reasoning, capacity for analysis, synthesis, abstraction, deduction, as well as establishing the basis of a project that It can be replicated for use in other units.

Keywords: academic performance; strategic plan; digital competition; Latex.

LaTeX en actividades académicas del Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería

Resumen.- La educación de los nuevos tiempos, establece la imperiosa necesidad de replantear estrategias en la educación tradicional. En el marco de las competencias claves en la formación permanente, es imprescindible garantizar la igualdad para adaptarse a las necesidades de la sociedad. Las competencias se refieren a la capacidad para saber hacer, de allí la importancia de fortalecer la competencia digital a través del uso de las TIC, siendo el procesador de palabras Latex una herramienta con potencial beneficio en entornos científicos sobre aspectos tipográficos de un documento. La Facultad de Ingeniería se ha propuesto incentivar la publicación de investigaciones, por eso un individuo con mejor formación producirá mejores resultados, introduciendo la utilización de Latex en todas las etapas de formación y comenzando en las etapas tempranas. El individuo desarrolla las competencias y se encuentra en condiciones de plasmar las mismas, al comienzo con los reportes técnicos y posteriormente en trabajos de investigación, artículos científicos y trabajos especiales de grado. Además, el bajo rendimiento en los estudiantes del Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería por diferentes factores, nos impulsa a hacer la propuesta estratégica del uso del procesador de palabras Latex en actividades académicas tanto de estudiantes como de profesores para brindar una competencia que coadyuve a mejorar el rendimiento académico. Latex como recurso didáctico facilita el proceso de escritura de texto ordinario y matemático con énfasis en la simbología matemática de ahí que al mismo tiempo beneficia el razonamiento matemático, capacidad de análisis, síntesis, abstracción, deducción, además de fijar las bases de un proyecto que puede ser replicado para su utilización en otras dependencias.

Palabras clave: rendimiento académico; plan estratégico; competencia digital; Latex.

Recibido: 09 de diciembre, 2019.
Aceptado: 06 de marzo, 2020.

1. Introducción

En el último siglo, diversos especialistas de la educación a nivel mundial coinciden en dirigir sus teorías a replantear la educación y así brindar competencias necesarias para afrontar

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*romanyanitza1@gmail.com (Y. Román)

la sociedad actual entorno al futuro, donde la tecnología sea aprovechada al máximo y se integre de forma eficiente y eficaz en las unidades de formación, mediante el empleo de recursos educativos abiertos.

En la educación tradicional al pasar del tiempo, se hace notable que el proceso de enseñanza y aprendizaje de nuevos conocimientos de forma repetitiva pierde vigencia, así lo señala teorías de psicólogos tales como Vigotsky, Piaget y Ausubel, justamente enmarcadas en el paradigma del constructivismo [1], donde el nuevo conocimiento que se adquiere es el resultado de la interacción del individuo con el entorno que lo rodea, a través de sus propias experiencias, habilidades y capacidad de interpretación de las herramientas que recibe, y no de forma mecánica y unidireccional.

A propósito de lo señalado, en las unidades curriculares del Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería se evidencia, según reportes recientemente realizados, como la evaluación del componente docente (ECD), un índice significativo de reprobados, lo cual obedece a múltiples factores que deben ser objeto de revisión.

El Departamento de Matemática y la Dirección del IMYCA, tienen entre sus políticas el desarrollo de actividades en conjunto, orientadas con el fin de buscar la mejora del rendimiento de los estudiantes del Departamento de Matemática a través de la incorporación de las nuevas tecnologías TIC, empleando para ello el procesador de palabras Latex por lo que propone a la Facultad de Ingeniería su utilización en cada etapa de la formación del ingeniero. Y así coadyuvar a que el individuo desarrolle estas competencias y se encuentre en condiciones de plasmar las mismas, al comienzo con reportes técnicos y posteriormente en trabajos de investigación, artículos científicos y trabajos especiales de grado. El éxito que se logre con el empleo de Latex en las asignaturas del Departamento de Matemática, ha de permitir fundar las bases para su utilización en las diferentes etapas de la formación del Ingeniero. El logro que se busca alcanzar con esta investigación, ha de permitir generar cimientos sólidos para la aplicación de la herramienta Latex y su dominio en el Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería y posteriormente generar el impulso necesario para su utilización en todas las etapas de la formación del Ingeniero, además de dejar abierta la posibilidad de un proyecto más ambicioso que se enmarque en la elaboración de un laboratorio de Latex.

En otras palabras, se hace necesario aplicar nuevas estrategias que consideren elementos que relacionen al estudiante con su entorno, cambios curriculares y estructurales, que contribuyan a mejorar la enseñanza de la matemática con un aprendizaje significativo [2], a través de las experiencias, según el enfoque de la psicología hacia la educación constructivista.

Particularmente, en la enseñanza y aprendizaje de la matemática Ricardo Cantoral dice “El pensamiento matemático es una relación de aquello que el profesor se propone a enseñar en matemática y lo que en efecto los estudiantes son susceptibles de aprender” [3]. Por tanto, el sujeto que aprende está comprometido con algo que necesariamente lo lleva a simbolizar. Se trata de una elaboración (con características internas propias del individuo, o sociales o ambas) que se organiza en los sistemas semióticos de representación [4].

Específicamente en matemática, la concepción de un objeto pasa por distintas representaciones semióticas. Diferentes representaciones simbólicas para referirse a un mismo concepto. De allí que en matemática se trabaja con objetos que generalmente no pertenecen a las experiencias o realidades cotidianas del estudiante. Por consiguiente, la asimilación conceptual necesita de medios donde se manipule con más frecuencia tales objetos. El computador teleológicamente hablando coadyuva en la labor de aprendizaje de la matemática, haciendo que símbolos y conceptos estén más ligados a las experiencias concretas de los estudiantes, además de aumentar la productividad en cuanto a la concreción de mayor cantidad de tareas para lograr así mayor cantidad de experiencias.

El procesador de palabras Latex ha de permitir establecer un mayor orden de las tareas, además de facilitar el trabajo y la limpieza en la escritura, así como también, fomentar la creatividad y el espíritu crítico necesario para el razonamiento matemático,

potenciando la habilidad para el cálculo y un medio para hacer una matemática más experimental con el apoyo de recursos didácticos, con el fin de unir lo abstracto de la matemática con lo concreto de las experiencias del alumno y con ello buscar que este vaya más allá de la indagación y concreción.

Desde lo experimental como estrategia de recurso didáctico para reforzar el aprendizaje de escritura de la matemática, el procesador de palabras Latex es una herramienta con alta capacidad gráfica para representar ecuaciones matemáticas, muy utilizadas en documentos y revistas científicas, facilitando la estructura y edición. Excelente calidad en el documento final, es un software libre, los ficheros fuente **.tex** son ficheros ASCII permitiendo que el documento sea reconocido en cualquier sistema operativo.

Por las razones antes señaladas, el objetivo de ésta investigación es Implantar el uso de procesador de palabras Latex en actividades académicas desarrolladas por estudiantes en las unidades curriculares del Departamento de Matemática, como herramienta que agregue valor al proceso de enseñanza y aprendizaje, unido a las clases magistrales de aula.

Actualmente, en la Escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, se desarrolla el entorno para la composición tipográfica Latex en la edición de Trabajo Especial de Grado, además en la revista científica Ingeniería UC se propone para la edición de artículos el uso de una plantilla realizada en Latex [5, 6], como herramienta soporte para el diseño, planificación y ejecución de actividades didácticas que fortalezcan el proceso de aprendizaje de matemática dentro y fuera del aula.

2. Metodología

Conforme a la problemática planteada, se refiere la imperiosa necesidad de proponer una estrategia en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la matemática, de forma inductiva a través de la experiencia, que en éste trabajo de investigación procura desarrollar la implementación del procesador de palabras Latex, el cual ha de conducir su orientación a través de la concreción de los siguientes aspectos:

- Diagnosticar el nivel de conocimiento de profesores del Departamento de Matemática sobre procesadores de palabras y la habilidad para su uso en el área de la matemática.
- Diagnosticar el nivel de conocimiento de estudiantes del Departamento de Matemática sobre procesadores de palabras y la habilidad para su uso en el área de la matemática.
- Analizar y establecer el nivel de conocimiento en relación a la identificación de símbolos y estructuras matemáticas en estudiantes que cursan unidades curriculares del Departamento de Matemática.
- Instruir a profesores del Departamento de Matemática en el uso del procesador de palabras Latex, por medio de cursos presenciales y tutoriales online.

El proceso de investigación tiene una metodología cualitativa mediante la observación investigativa, encuestas o entrevistas y documentación [7].

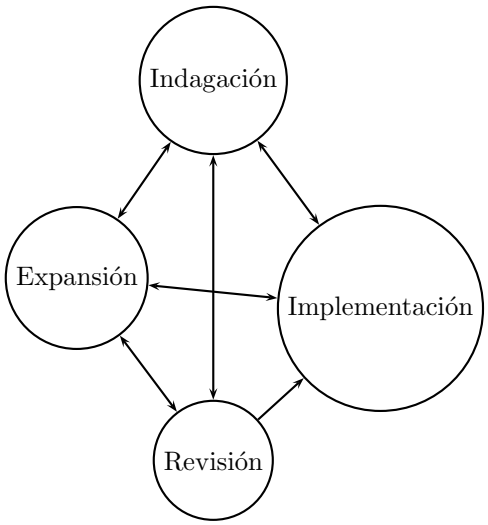


Figura 1: Fases de la investigación.

Desde el punto de vista cualitativo, los hallazgos de la investigación se manifiestan de acuerdo a un plan estratégico a seguir indicado en Figura 1. El

plan estratégico concreta los objetivos de acuerdo a la consecución de cada una de las cuatro fases:

Fase de indagación. Se elaboraron instrumentos bajo el esquema de formulario para consultar a la población objeto de investigación, se diagnosticó el nivel de conocimiento de profesores y estudiantes del Departamento de Matemática sobre el procesador de palabras Latex, así como también la habilidad para su uso en el área de matemática. Además, se elaboraron instrumentos que permiten analizar y establecer el nivel de conocimiento, con relación a la identificación de símbolos y estructuras matemáticas donde se evidencie tanto los conocimientos previos que debe dominar el estudiante al inicio de cada unidad curricular del Departamento de Matemática como las competencias a ser alcanzadas al final del contenido programático.

Fase de implementación. Esta fase consiste en la elaboración y aplicación de una serie de talleres de formación a nivel básico referente al procesador de palabras Latex, el cual es dirigido a profesores del Departamento de Matemática.

Con ayuda de la dirección de IMYCA se han de establecer espacios de trabajos que propicien la participación de la mayor cantidad de docentes de la plantilla de Departamento para el periodo de estudio, asimismo por contar el departamento con un número de docentes que ya posee conocimiento básico, se espera que el total de profesores que obtengan conocimientos básicos sea significativo en torno al tema.

Seguidamente, se espera unir esfuerzos y llevar a un grupo de profesores hasta un nivel intermedio y avanzado, así como integrar a participar estos profesores que ya han incursionado de forma particular en Latex y requieran ampliar sus habilidades en la herramienta.

Fase de revisión. Dentro de esta fase es preciso dos etapas *seguimiento* y *evaluación.* La etapa de *seguimiento* tiene en cuenta recopilar los recursos didácticos producidos a través de la ejecución y revisión de las tareas propuestas en las actividades académicas realizadas por los estudiantes mediante el uso de procesador de palabras Latex. La etapa de *evaluación* amerita examinar el rendimiento de los alumnos en respuesta a la estrategia de usar el procesador de palabras Latex.

Fase de expansión. Prestar servicios externos tales como:

- Edición y generación de documentos científicos requeridos por la Revista Ingeniería UC.
- Realizar cursos de Latex a la comunidad interesada.
- Creación de un Laboratorio de Latex.

3. Resultados

Inicialmente se pudo evidenciar que los conocimientos previos eran inexistentes en los estudiantes acerca del procesador de palabras Latex.

Es de resaltar que a la fecha se han concretado una serie de talleres con docente del Departamento de Matemática Tabla 1 y estos se han realizado con equipos propios de profesores o concedidos en calidad de préstamo, por lo que se espera para la prosecución del proyecto, conseguir fuentes de financiamiento a través de entes públicos o privados y así poder avanzar de manera más eficiente y eficaz en la consecución de las fases de *implementación*, *revisión* y especialmente necesario en la fase de *expansión*, para el cual es imprescindible disponer de un laboratorio de Latex.

El Departamento de Matemática en el marco del 1^{er} Congreso Internacional y 2^{do} Nacional de Ciencia, Tecnología y Empresa Tendiendo las redes del conocimiento, presentó el simposio *Competencias Matemáticas en Ingeniería, el reto de los nuevos tiempos* [8]. Donde entre los factores más notables se evidencia deficiencia de los conocimientos previos de matemática básica del estudiante al ingresar en la educación universitaria, siguiendo por el proceso de enseñanza y aprendizaje en la

Tabla 1: Talleres de Latex realizados en el Departamento de Matemática

N° de Docentes que Conformaron los talleres	*19*
N° de Docentes que Trabaja con el editor y no participaron en los talleres	*9*
Total de Docentes del departamento para el periodo de estudio	*50*
% de Docentes que Domina el Editor en un Nivel Básico	*56 %*

Facultad de Ingeniería en la forma tradicional de impartir los conocimientos con clases magistrales basándose en las capacidades y habilidades del estudiante como receptor, el cual se agota con los nuevos tiempos cuando no se aprovecha el uso de los avances de la tecnología. Otro factor no menos importante es la situación económica del país, afectando a todo nivel, tanto a estudiantes en su rendimiento académico, profesores que se les dificulta impartir el contenido de la unidad curricular de forma 100 % presencial, así como capacidad financiera de la institución universitaria.

Así mismo producto de las indagaciones e investigaciones presentadas en el simposio [8], es de resaltar que entre otros aspectos es imprescindible el énfasis en establecer una simbiosis perfecta del uso y dominio de las TIC desde las aulas de clases, al punto que se presenta el empleo de la tecnología como pre-requisito que beneficia el aprendizaje de forma eficaz y motivadora. Por ello, considera la competencia digital para una correcta integración en el sistema, en conjunto con las TIC y así los docentes puedan contribuir en el mejoramiento de la formación, puesto que son corresponsables de la enseñanza en el nuevo milenio y deben guiar al estudiante en su transitar educativo a través de los nuevos medios por lo que han de contar con las capacidades que le permitan el compartir y desarrollar dichas competencias.

4. Conclusiones

La orientación de este trabajo permite concretar algunas de las premisas del constructivismo en lo que se refiere a la idea de aprender a aprender, lo cual se traduce en desarrollar la capacidad de persistir en el proceso de aprendizaje, el cual requiere la adquisición de competencias fundamentales como alfabetización, la aritmética y las TIC. Con estas destrezas como base, el individuo puede acceder, ganar, procesar y asimilar nuevas habilidades y conocimientos.

Con este proyecto se busca generar los cimientos para el uso de Latex, como herramienta que ha de coadyuvar al ingeniero en el desarrollo de tareas a lo largo de su carrera.

El uso de Latex mejora el potencial en el aprendizaje del estudiante y su rendimiento, ampliando el uso de herramientas digitales en el desarrollo y formación profesional de profesores, además de los recursos que ya utiliza. Asimismo, contribuye a un cambio de paradigma en la educación tradicional hacia un aprendizaje por competencias.

Humaniza el aprendizaje de la matemática, suavizando la aversión que paradójicamente tienen los estudiantes hacia la ciencia de la matemática, aprovechando los beneficios del uso de Latex.

La concreción en la ejecución de la propuesta ha de permitir fijar las bases de un proyecto que puede ser replicado y amplificado de manera factible para su utilización en otras dependencias instituciones.

En este mismo orden de ideas es de resaltar que el impulso en el uso de aplicación de la herramienta Latex en otras dependencias, posibilitará la concreción de un proyecto más ambicioso como es la estructuración del laboratorio de Latex de la Facultad de Ingeniería.

5. Referencias

[1] C. Tünnermann Bernheim, "El constructivismo y el aprendizaje de los estudiantes," *Universidades*, no. 48, pp. 21–32, 2011.

[2] M. L. Rodríguez Palmero, M. A. Moreira, M. C. Caballero Sahelices, y M. G. Ileana, *La teoría del aprendizaje significativo en la perspectiva de la psicología cognitiva*. Editorial Octaedro, S.L., 2008.

[3] R. Cantoral, "Enseñanza de la matemática en la educación superior," *Sinéctica, Revista Electrónica de Educación*, no. 19, pp. 3–27, 2001.

[4] B. D'Amore, "Interacciones constructivistas en el aprendizaje de los conceptos matemáticos: conceptualización, registros de representaciones semióticas y noética,"

en *Enseñanza y aprendizaje de las matemáticas: problemas semióticos, epistemológicos y prácticos*, 1^{era} ed. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017, capítulo 3.

[5] C. Mejías, A. Osman, P. Del Pino, y A. Zozaya, "Carta al editor: Entorno para la edición y redacción de trabajos especiales de grado de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo," *Revista Ingeniería UC*, vol. 24, no. 1, pp. 1–11, 2017.

[6] J. Jiménez, C. Vega, y A. Osman, "Letter to the editor: Use of template for the preparation of the articles in scientific journal," *Revista Ingeniería UC*, vol. 25, no. 1, pp. 4–9, 2018.

[7] R. Hernandez Sampieri, C. Fernandez Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 5^{ta} ed. México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A., 2010.

[8] J. Ordoñez, "Competencias matemáticas en ingeniería el reto de los nuevos tiempos," en *Redes del conocimiento y emprendimiento*. San Diego, Carabobo, Venezuela: Universidad Arturo Michelena, 2019.

Creating a structure to calculate the organizational and technological process control effectiveness during redeployment

Azariy Abramovich Lapidus *,

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

Abstract.- According to the UN forecast, more than 60 % of the world's population will live in cities by 2035. Thus, the burden on the structure of housing and communal services, transport, security, health care, education, and other infrastructure components will increase as the number of residents. Many, especially old, industrial enterprises are unable to withstand competition and the economic dimension of their existence and are unable to provide an adequate environment. In this regard, the most rational and mutually beneficial solution is to transfer such enterprises beyond the line of cities, or to specially allocated industrial areas with the subsequent reassignment of the liberated territory for the needs of the city itself, construction of housing, or socio-cultural or business facilities. The main purpose of this article is to assess the relevance and timeliness of consideration of the problems of organizing production during the redevelopment of industrial territories of the urban environment. The basic prerequisites for the formation of a phenomenon such as redevelopment are discussed, and parameters that have a major impact on decision-making about methods for changing the functional purpose of urban industrial areas are also identified. Likewise, common trends are identified in the relocation of industrial areas in the urban environment in Russia and abroad. To implement such projects, it is necessary to form at the design stage a system of organizational decisions aimed at effectively addressing environmental issues, re-equipping production forces, and also solving social urban problems.

Keywords: construction control; redeployment of industrial facilities; redevelopment of industrial areas; scientific and technical renovation substantiation; urban development.

Creación de una estructura de cálculo para el proceso de control de efectividad tecnológica y organizacional durante reubicaciones

Resumen.- Según la previsión de la ONU, más del 60 % de la población mundial vivirá en ciudades para 2035. Por lo tanto, la carga sobre la estructura de la vivienda y los servicios comunales, el transporte, la seguridad, la atención de la salud, la educación y otros componentes de infraestructura aumentará a medida que aumente el número de residentes. Muchas empresas industriales, especialmente antiguas, son incapaces de resistir la competencia y la dimensión económica de su existencia y son incapaces de proporcionar un entorno ambiental adecuado. En este sentido, la solución más racional y mutuamente beneficiosa es trasladar dichas empresas más allá de la línea de las ciudades, o a zonas industriales especialmente asignadas con la posterior reasignación del territorio liberado para las necesidades de la propia ciudad, construcción de viviendas o instalaciones socioculturales o empresariales. El objetivo principal de este artículo es evaluar la relevancia y oportunidad de considerar los problemas de organización de la producción durante la reurbanización de los territorios industriales del entorno urbano. Se analizan los requisitos previos básicos para la formación de un fenómeno como la reurbanización, y también se identifican los parámetros que tienen un impacto importante en la toma de decisiones sobre los métodos para cambiar el propósito funcional de las áreas urbanas industriales. Así mismo, se identifican tendencias comunes en la reubicación de las áreas industriales del entorno urbano en Rusia y en el extranjero. Para llevar a cabo este proyecto, es necesario formar en la etapa de diseño un sistema de decisiones organizativas destinadas a abordar eficazmente los problemas ambientales, reequipar las fuerzas de producción y también resolver los problemas urbanísticos sociales.

Palabras clave: control de construcciones; redistribución de instalaciones industriales; remodelación de zonas industriales; fundamentación científica y técnica de renovación; desarrollo urbano.

Received: March 02, 2020.
Accepted: April 20, 2020.

* Correspondence author:
*e-mail:*azariy.lapidus@yandex.ru (A. A. Lapidus)

1. Introduction

One of the most controversial issues in the re-profiling is the optimal direction of implementation of such projects, which should take into account

the complex issues of urban planning, functional, social, organizational, technical, economic, and environmental character. Cultural experts and historians are concerned about the preservation of ancient historical artifacts and *industrial heritage*, urban planners, and architects of new layout of these territories and their organic inclusion into the environment and infrastructure, developers and investors-–development of such territory from the point of view of its conversion to more efficient use, which enhance its attractiveness, investment, successful development of the allocated funds, and increase the value of the land and constructed or reconstructed buildings.

Most often, industrial buildings are repurposed into creative clusters, office, and multifunctional complexes. Currently, the weaving factory on the Obvodny canal in St. Petersburg functions as a multifunctional cultural platform–creative space–*Weavers* (total area is 1.3000 m^2), which includes both retail space and art galleries, offices, and exhibition space for cultural and educational processes. In the historical square within the Yekaterinburg plant, which now consists of a landscape Park on the right Bank of the Iseti river and a Museum complex on the left Bank, where many residents of the city spend their time, mass events are held. The former distillery in Tula, currently operates as a multifunctional complex *Likerka Loft*. The former industrial premises are repurposed for trade, entertainment area, supermarkets, offices, fitness centers, and schools, according to Table 1. In Lodz (Poland), the factory complex of Israel poznań was repurposed into a multifunctional cultural, commercial, sports, and entertainment center with a total area of 150.000 m^2, of which 100.000 m^2 accounts for retail, 20.000 m^2 for hotels and offices, 21.000 m^2 for entertainment, 8.000 m^2 for museums, and 1.000 m^2 for children's play complex. However, the complex occupies an area of 30 Hectares and is a place of attraction of human flows, meeting the interests of local residents and tourists.

The re-profiling volumes of the urban areas clusters are constantly increasing; harmonious interaction of the state and private companies is important for successful PCGT and rational use of the urban areas, since the re-profiling projects can be implemented only on the terms of acceptable profitability of all participants and investment attractiveness of objects. It is important to develop the scientifically-based methods that provide effective management decisions to develop residential and commercial real estate in the territories of old industrial enterprises.

The volumes of the re-profiling of the urban areas clusters are constantly increasing and thus harmonious interaction of the state and private companies is important in the successful and rational use of the urban areas because the re-profiling projects can be implemented only on the terms of acceptable profitability of all participants and investment attractiveness of objects. Organizational and technical processes during the construction and installation works in the course of the conversion of real estate and the use of industrial territory for a new purpose are of high importance.

Hence, it is necessary to have digital repurposing information systems (DRIS) that allow repurposing process participants to assess at each stage of decision-making the factors influencing the project forecasting and implementation. In this regard, DRIS is one of the key factors of decision-making by the re-profiling participants, both at the pre-investment stage and in the process of design, construction, operation of a new facility, and the factor of investment attractiveness of the territory, which reduce the risks of incorrect information and the respective problems. It is notable that the possibility of advanced organizational and technological modeling of construction and installation works (CIW) at the re-profiling facility will allow to take into account all key parameters and, thus, increase the overall efficiency in decision-making for both the investor and the potential customer. To do this, it is necessary to systematically study the main factors and processes in CIW in the repurposing of industrial facilities in order to form a methodology that will provide *smart* modeling of CIW. Such modeling is advisable to coordinate with the state program *Digital economy of the Russian Federation*, which treats the digital economy as a business activity, in which the

Table 1: Share of production clusters of urban areas in the structure of the Land Fund of the largest Russian and foreign cities, in 2018.

Russian cities	Share of urban industrial zones in city area, %	Foreign cities	Share of urban industrial zones in city area, %
Moscow (within the boundaries of old Moscow)	20	Paris	5
St. Petersburg	13	NewYork	4
Yekaterinburg	14	Boston	3
Nizhny Novgorod	12	Seoul	6
Perm	11	Singapore	3

key role is played by data in digital format and contributes to the formation of a single information space, development of information infrastructure in municipalities, economic sectors, and in the country as a whole. Thus, the digital economy should form a new technological basis for the entire socio-economic sphere.

In order to be successful and compete in a complex market, redevelopment should take place as one of the ecosystems, the operator of which at the top level should be the state and specific municipalities, which have full information about industrial areas as potential objects of redevelopment, and at the next levels, such ecosystems should be complemented around themselves by ecosystems such as an information system for redevelopment investors, supervisory and licensing authorities, realtors, architects, and design organizations, construction companies, real estate operators, real estate tenants, ecosystem of life–style services, and so forth. The leaders of ecosystem services in Russia are currently banks, which recently have been forming ecosystem sets around themselves and adding new sets of services to their business.

The structures listed above are not the construction organizations and these examples are united by a digital technological component. In fact, ecosystem participants prefer a digital business model and seek to use the digitized processes. Finally, participants interact with each other using a single digital platform for the community, which becomes a trusted environment for collaboration.

In order to get acquainted with the current state of affairs in the issue under consideration, as well as to study the latest developments in the given field, it is necessary to refer to scientific publications by Russian and foreign scholars. The paper considers the articles by such authors as D.V. Topchiy, A.I. Meneyluk, L.V. Lobakova, I. Abramov, A. Lapidus, S. Newton, V.A. Pukhkal, A.B. Mottaeva and others.

However, Zueva [1] argue that neither at the planning stage nor at the implementation stage in Russia there are no effective, scientifically based systems. To solve this problem, the authors consider the use of information complex interaction system consisting of a large number of different functional subsystems and modules that are investment, organizational, technological and information [2]. Meneylyuk and Lobakova [3] state that the technology of re-profiling or changing the purpose of the building is significantly different from new construction and has its own characteristics, which confirms the conclusions made in this work.

As the most general factors that influence the planning of the re-profiling process and have interrelation, such parameters as the cost of the project, the number of working shifts a day, the number of working days a week, the coefficient of combination of works, and financing conditions are specified. In [3] authors recommend to perform the relationship between these parameters by using the mathematical theory of experiment planning, which is a fundamental part of the theory of experimental and statistical modeling.

2. Methodology

The main regulatory document describing the construction control and its implementation is the town planning code of the Russian Federation. Article 53 of the Civil Code of the Russian Federation refers to the quality control goals, determines the responsible persons and describes the procedure for notifying the state construction supervision authorities about cases of emergencies in a capital construction project [2].

In general, the facilities under control are described [3]. Stages and composition of the construction control by the contractor and customer at the redeployed facility are performed in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation of June 21, 2010 No. 468. Upon the analysis of this document, the composition may be briefly described, and the degree of regulatory work control is determined.

Stage 1. Input control. Quality control of the building materials, products, structures, and equipment supplied for the capital construction facility construction. When evaluating quality control measures, a point system must be used. In this case, the following procedures are regulated at this stage [4]:

1. Checking the availability and content of the suppliers' documents containing information about the quality of their products;

2. Its compliance with the requirements of working documentation, technical regulations, standards, and codes of practice. The stage is assessed with two points.

Stage 2. Control of storage rules. Verification of the compliance with the established standards and rules to store the used products [5]: identification of violations of the established norms and product storage rules.The stage is assessed with one point.

Stage 3. Control of technological operations. Verification of the compliance with the sequence and composition of technological operations during the capital construction facility construction [6]:

1. Compliance with the sequence and composition of technological operations.

2. Compliance with the technological operations in accordance with the requirements of technical regulations, standards, codes of practice, design documentation, engineering surveys, and urban planning of a land plot.

3. Correspondence of the quality of the technological operations and their results to the requirements of the design and working documentation based on it.The stage is assessed with three points.

Stage 4. Control of the hidden work and critical structures. Examination of the work hidden by the subsequent work and intermediate acceptance of the building structures erected affecting the safety of the capital construction facilities and sections of engineering networks together with the customer [7]:

1. Control of the ban on the premature execution of the subsequent work and preparation of an act on the hidden work examination.

2. Drawing up an intermediate critical structure control certificate. The stage is assessed with two points.

Stage 5. Control of the work stages. Acceptance of the finished work types (stages): drawing up a certificate on the control measure and its results. Filling out the general work log with the relevant acts attached. The stage is assessed with one point.

Stage 6. Control of the documentation compliance. Checking the compliance of a completed construction facility with the design requirements and working documentation based on it, the results of the engineering surveys, urban land plot development, plan requirements, and technical regulations together with the customer [1]: drawing up a certificate on the control measure and its results. The stage is assessed with one point.

According to the regulatory documentation, there are 10 points for construction control measures. The question about the number of

measures (the number of the construction and installation control degree points) at the redeployed facilities remains open. Since there is no normative document to redeploy the industrial facilities, a scientific study must be conducted with the aim of the development of a mathematical model determining the construction and installation quality control degree.

The points governing the implementation of various work control procedures during the redeployment represent various measures, among which there is, for instance, additional control during the construction phase, additional verification of the suppliers' documents containing information about the materials supplied, and additional control over the sequence and composition of technological operations.

The standard number of workers performing the construction control regarding the base price level transfer as of 1 January 2000 up to the 1st quarter of 2019 is 1 person for every 112 million rubles of the estimated cost according to the decree of No. 468 (Appendix 1) and the letter of the ministry of construction of the Russian Federation No. 1408-LS/09 of 22.01.2019 [8, 9].

Currently, redeployment of industrial buildings as one of the modern components of technological progress is the subject of several scientific studies. For example, control of the organizational and technological processes is one of the study areas in this direction.

3. Results

Life cycle of the capital construction facilities for industrial purposes, capital construction objects (including individual buildings, structures, and town-planning formations for industrial use) are classified as the construction products. Construction products in the format of buildings and structures for industrial purposes are the object environment of a long (long-term, determined by the service life) period of use. In fact, the degree of conformity of actual safety indicators and functional efficiency of the completed construction projects with the established design and regulatory values determines the quality of the construction products [10]. The main feature of the construction products (especially unique and/or technologically complex industrial facilities) as a material subject of the productive and reproductive activity is also significant (e.g., duration, complexity,the amount of the costs required for its formation (construction) and subsequent operation). However, it is a complex job to ensure the functional quality of the construction products, the solution of which is implemented over a long period, during which there is a constant transformation of the properties and conditions of construction objects. Thus, the considered time is called the life cycle of the construction products (including industrial construction projects). Figure 1 shows the life cycle of a construction object in the form of a temporary logical structure, characterized by a sequential change in the states (stages, periods) included in the structure of the structure.

The life cycle of an industrial construction object has the form of a consistent, hierarchical, and strictly oriented structure and includes the following main stages or mandatory steps, including *Construction surveys*, *Design*, *Construction* (new construction, reconstruction, expansion), and *Exploitation*.

One of the features of the life cycle of the construction products is the fact that the efficiency of each subsequent stage is determined by the quality of the organizational and technological solutions implemented at the previous period [11].

Thus, the performance indicators of the production processes as well as the state of bearing and enclosing structural elements of the production building or structure are characterized by the quality of adoption and practical implementation of composite, structural organizational and technological solutions developed at the previous *design* and *construction* stages. Hence, efficiency of the decisions taken and implemented can be adequately assessed only at the end of all periods of its life cycle.

Moreover, the life cycle stage of the type *Construction Surveys* provides for a set of measures aimed at the analysis of the economic and engineering factors necessary for making a fundamental decision on the expediency of forming

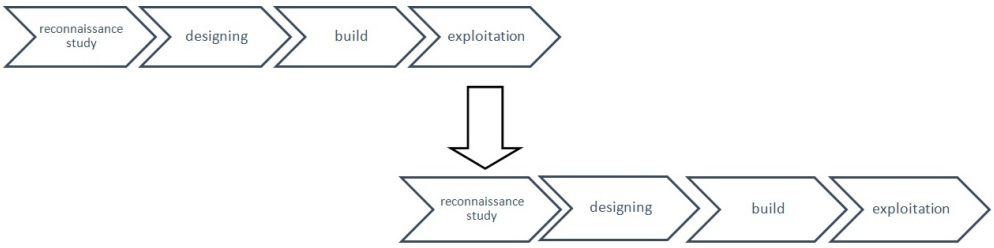


Figure 1: The life cycle of a construction object.

construction products of a certain functional purpose.

Design stage is a set of works and processes, during the implementation of which the design is developed, which shows the solutions necessary for preparation and construction of the construction facility under the construction site conditions. Design works are conducted based on the design task and depending on the complexity of the construction object are performed in one or two stages [12].

Construction stage defines the format of a practical implementation of the design solutions of the construction objects in one of the possible formats: new construction, reconstruction, expansion, and technical modernization.

Operation stage is intended to organize the operation of the facility for construction of industrial purpose under the established environmental conditions by complying with the regulated set of measures aimed at maintaining the quality of the facility completed by construction and its structural elements: reliable works of separate structural elements and object, in general; providing normal sanitary and hygienic conditions and parameters of internal space; ensuring implementation of the rules and standards of the fire safety; decrease or minimization of an environmental pressure from the technological processes and/or processes of activity, and restoration of the lost quality by a systematic observation and carrying out a planned repair work.

Operation of the erected construction facility is permitted if the actual characteristics correspond to the established values. In order to ensure the proper technical condition of the construction facility, an operational monitoring and repair system is developed, which allows assessing and maintaining the technical condition, quality indicators, and reliability at the specified level [13].

In a significant majority of cases, it is the duration of service life that determines the life cycle of the construction object, and therefore it is an objective criterion or indicator of the quality of the design solutions and the quality of construction production.

4. Discussion

The rational category of causes includes:signs of a satisfactory technical condition of the main structural elements; the features of the space-planning decisions allowing to realize modernization of initial function or provide conditions for new function of a production and/or non-productive look; the level of necessary technical and economic expenses at reconstruction of an object for production; existence of the status of *object of cultural and historical heritage*, and possible attraction of additional investments into the development of a town-planning situation due to the formation of new architectural objects of various functional purposes.

The emotional category of causes includes danger of loss of town-planning appearance and historical memory of the corresponding building; possible loss of the existing harmony and ways of visual interaction with the surrounding artificial and natural landscape, and threats to increase the environmental burden on the environment due to the dismantling of the existing construction site and new construction [14],[15].

The information model should provide prompt search, unambiguous identification, and comprehensive up-to-date characteristic of the technical condition of the structural elements, parts, and systems of the construction object. Formation of an information support to develop organizational and technological sequence of the reprofiling of a production facility is a complex, multi-stage process (especially with regard to the buildings and structures classified as objects of cultural and historical heritage and/or cultural and historical significance).

5. Conclusion

The field of practical activity related to the improvement of the quality of construction facilities is quite diverse and allows the use of modern (innovative) architectural concepts, construction materials, and technological techniques of construction.

Formation of the information model of the construction object, which differs as complete and reliable information as possible, allows optimizing the composition and efficiency of the organizational and technological solutions.

6. References

[1] D. D. Zueva, E. S. Babushkin, D. V. Topchiy, and A. Y. Yurgaitis, "Construction supervision during capital construction, reconstruction and re-profiling," in *International Geotechnical Symposium "Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region" (GCCETS 2018)*, S. Kudryavtsev, C. Yoo, and A. Zhussupbekov, Eds. MATEC Web of Conferences, Jul. 2019, vol. 265, pp. 1–8.

[2] A. Lapidus and D. Topchiy, "Formation of Methods for Assessing the Effectiveness of Industrial Areas' Renovation Projects," in *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 471, 2019, pp. 1–6.

[3] A. I. Meneyluk and L. V. Lobakova, "Methodology for choosing effective models for the implementation of buildings reprofiling projects," *Bulletin of the Kharkov National Technical University. Series: Management Strategy, Portfolio Management, Programs and Projects*, vol. 1, pp. 76–81, 2016.

[4] Z. Pezeshki and S. A. S. Ivari, "Applications of BIM: A Brief Review and Future Outline," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 25, pp. 273–312, 2018.

[5] V. A. Pukhkal and A. B. Mottaeva, "FEM modeling of external walls made of autoclaved aerated concrete blocks," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 81, pp. 203–212, 2018.

[6] S. Newton, "The Being of Construction Management Expertise," *Construction Management and Economics*, vol. 34, pp. 7–8, 2016.

[7] A. Jurgaitis, D. Topchiy, A. Kravchuk, and D. Shevchuk, "Controlling methods of buildings' energy performance characteristics," in *Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018) electronic edition*. E3S Web of Conferences, 01 2019, vol. 91, p. 02026.

[8] A. Volkov, V. Chulkov, R. Kazaryan, M. Fachratov, O. Kyzina, and R. Gazaryan, "Components and guidance for constructional rearrangement of buildings and structures within reorganization cycles," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 580–583, pp. 2281–2284, Jul. 2014.

[9] A. Volkov, A. Sedova, P. Chelyshkov, B. Titarenko, G. Malyha, and E. Krylov, "The theory of probabilities methods in the scenario simulation of buildings and construction operation," *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 7, pp. 2416–2420, 2016.

[10] A. Ginzburg, "Sustainable building life cycle design," in *XV International conference "Topical problems of architecture, civil engineering, energy efficiency and ecology"*. MATEC Web of Conferences, 2016.

[11] P. Chelyshkov, "Application of Computer Simulation to Ensure Comprehensive Security of Buildings," in *Abstract Volume, 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (14th ICCCBE)*, 2012, pp. 430–431.

[12] A. Andreeva and P. Chelyshkov, "Management of parameters of the functioning of engineering systems of the building object based on algorithmic data analysis," in *Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series, 2018, p. 022041.

[13] P. Chelyshkov, "Use of BIM in Design of Standard Facilities," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, pp. 15 119–15 121, 2017.

[14] D. Lysenko and P. Chelyshkov, "The method of optimization of energy-efficient engineering solutions by varying criteria in CAD," in *Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series, 2018, vol. 365, p. 022027.

[15] A. Sedov, P. Chelyshkov, A. Afanasev, M. Vainstein, Y. Vilman, and Y. Grossman, "The analysis of expediency of daylight sensors using by application ofthe combined strategy of artificial lighting management," *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 7, pp. 1046–1053, 2016.

Planning and design of urban bikelanes. Metropolitan Area of Valencia (AMV), Venezuela

Isandra Villegas * , Betty Farias

Escuela Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- This research addresses the problem of urban mobility in Venezuelan cities that have been going through their worst crisis, exacerbated by the political-economic scenario that has impacted one's basic services of first need: public transport. Citizens have had to opt for alternative means to be able to move, such as: trucks, pickup and motorbikes among others, putting their personal safety at risk. The city of Valencia does not escape this reality (high costs of passages, low wages and salaries, availability of cash, inaccessibility to fuel among others), so this research describes the process of implementing a non-motorized alternative mode of transport that incorporates a part of the affected users. The methodology includes: 1) Delimitation of the study area, 2) Field survey, 3) Demand study, 4) Selection of routes with the highest degree of feasibility, 5) Geometric design of the selected cycle network. The results showed a high acceptance of the bicycle as a mode of transport with details of the geometric design of a 64 km backbone network in the AMV. Concluding in this research that it is feasible to use bicycles as a means of sustainable transport in the city of Valencia.

Keywords: sustainable development; sustainable mobility; cycle network; transport; accessibility.

Planificación y Diseño de ciclovías urbanas. Experiencia Área Metropolitana de Valencia (AMV), Venezuela

Resumen.- Esta investigación aborda la problemática de movilidad urbana en las ciudades venezolanas que han estado atravesando su peor crisis, agudizado por el escenario político-económico que ha impactado en uno de los servicios básicos de primera necesidad: el transporte público. Los ciudadanos han tenido que optar por medios alternativos para poder trasladarse, tales como: camiones, pickup y motos entre otros, poniendo en riesgo su seguridad personal. La ciudad de Valencia no escapa de esta realidad (altos costos de pasajes, bajos sueldos y salarios, disponibilidad de efectivo, inaccesibilidad al combustible entre otros), por lo que esta investigación describe el proceso de implantación de un modo de transporte alternativo no motorizado que incorpore a una parte de los usuarios afectados. La metodología incluye: 1) Delimitación del área de estudio, 2) Levantamiento de campo, 3) Estudio de demanda, 4) Selección de las rutas con mayor grado de factibilidad, 5) Diseño geométrico de la red troncal de ciclovías seleccionadas. Los resultados arrojaron una elevada aceptación de la bicicleta como modo de transporte con detalles del diseño geométrico de una red troncal de 64 km en el AMV. Concluyendo en esta investigación que es factible el uso de las bicicletas como medio de transporte sostenible en la ciudad de Valencia.

Palabras clave: desarrollo sostenible; movilidad sostenible; red ciclovías; transporte; accesibilidad.

Recibido: 05 de marzo, 2020.
Aceptado: 28 de abril, 2020.

1. Introducción

A nivel mundial el ciclismo desempeña un papel importante dentro de los sistemas de transporte de las comunidades. Estudios realizados en las principales ciudades latinoamericanas y europeas durante la última década han demostrado que el ciclismo está creciendo en popularidad como medio de transporte y recreación.

En América Latina tanto Colombia como Brasil han sido los primeros países en promover el uso de la bicicleta como medio alternativo de transporte [1]. Hay relativamente pocos datos disponibles sobre el uso nacional de bicicletas. Sin embargo, según el Estudio Integral de Trasporte y Tránsito del Área Metropolitana de Valencia (EITTAMV) aproximadamente entre 1 y 3 % de los viajes diarios

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*Isandravillegas@gmail.com (I. Villegas)

se hacen en bicicleta y, el 20 % de la población manifestó utilizarla regularmente cada 15 días [2]. Por otra parte, el uso de bicicletas en algunas ciudades de la región está creciendo a una tasa de 3 a 5 % anual, por ejemplo según información de la Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría General (2018), "más de 835.000 personas se mueven en bicicleta en Bogotá", y en algunos casos alcanzando el 5,3 % del patrón de movilidad total de la ciudad según [3].

La intensidad de uso de la bicicleta varía de un lugar a otro bajo la influencia de los valores culturales, y los factores económicos, sociales, físicos y ambientales [4]. La bicicleta, como medio de transporte, ha sido asociada a la idea de pobreza por la sociedad desde el punto de vista económico, su bajo costo de adquisición y mantenimiento la hacen prácticamente el único vehículo al alcance de la mayoría de la población de escasos recursos económicos, producto de la incapacidad para adquirir un vehículo propio por el elevado costo de estos. Por su parte, la utilización indiscriminada del vehículo automotor ha tenido consecuencias ambientales, que sobrepasan los límites de aceptabilidad en amplias zonas de las regiones metropolitanas de la mayoría de las ciudades de tamaño grande y medio, generando como consecuencia la pérdida del carácter de uso urbanístico recreativo y cultural de las áreas centrales y desconcentración de la población a zonas de la periferia. Por lo que, el transporte eficiente de personas y mercancías cumple en las ciudades un rol esencial para el desarrollo de la economía y de sus necesidades sociales, ya que la demanda creciente de viajes en automóvil privado en las ciudades en el mediano plazo no serán posibles de satisfacer. En consecuencia, la mayoría de las autoridades de planificación de los sistemas de transporte, están frecuentemente evaluando la aplicación de medidas de administración del tránsito que puedan utilizarse para lograr un equilibrio aceptable entre las necesidades de transporte y de comunicación de las ciudades con una visión de sostenibilidad. Además, la búsqueda de una movilidad sostenible requerirá repensar la planificación urbana, con ciudades más densas y con zonas de uso mixto en las que no sea necesario utilizar el vehículo particular, combinando diferentes modos de transporte, extensas redes para bicicletas y peatonalizar espacios que permitan volver al más antiguo sistema de desplazamiento humano, caminar.

Todo lo anterior se relaciona con la libertad de desplazamiento de los ciudadanos, la cual se encuentra estrechamente relacionada con el acceso a distintos medios de transporte [5]. En el espacio urbano, los ciudadanos deben disponer de diferentes medios de transporte para desplazarse. Sin embargo, no todos los que viven en la ciudad tienen las mismas posibilidades de uso de los medios de transporte. Circunstancias personales como el nivel de renta, la edad, el género o las capacidades mentales o físicas condicionan la competencia en la utilización de los diversos modos de desplazamiento, introduciendo con ello una nueva fuente de desigualdad en la ciudad [6].

Una serie de consideraciones diferencian al transporte en bicicletas de otros modos de transporte en el ámbito urbano, las cuales son fundamentales y deben ser tomadas en cuenta para planificarlo, promocionarlo y poder integrarlo a los otros modos existentes que operan en la red vial, procurando los aspectos que brinden siempre la seguridad y el confort de los usuarios [7]. Se deben tener en cuenta los aspectos favorables que se mencionan a continuación: bajo costo de adquisición y mantenimiento, eficiencia energética, contribución a la salud de los usuarios, bajo impacto ambiental, equidad inclusión social, flexibilidad, rapidez, menor uso de espacio público. Sin embargo, su uso presenta aspectos desfavorables tales como: radios de uso limitado, sensibilidad a pendientes altas y rampas, exposición a la intemperie y contaminación de aire, vulnerabilidad a accidentes de tránsito, seguridad contra la delincuencia entre otros.

2. Fundamentación

Uno de los sistemas alternos de transporte a proponer por lo novedoso y por la expectativa que despierta su implantación, es un programa que incentive el uso de vehículos no motorizados como la bicicleta, que es un medio de transporte

ecológico, económico, y de fácil acceso para la población de menores recursos. Sin embargo, a pesar de muchos esfuerzos realizados en la planificación de este modo de transporte por diferentes autoridades locales e instituciones académicas a nivel nacional durante los últimos 10 años, hasta la presente fecha en las ciudades venezolanas se aprecia que el uso de este servicio es muy incipiente como modo factible de desplazamiento urbano [8]. Tampoco se han creado programas de transporte no motorizado con el objetivo de difundir e implementar el uso masivo de la bicicleta como medio alternativo de transporte popular, estudiantil y laboral; conociendo que el uso de la bicicleta es beneficiosa para la salud y significa economía para los usuarios, la bicicleta es un modo de desplazamiento seguro, eficaz y competitivo frente a otros modos de desplazamiento [9].

La posibilidad de movilizarse depende en gran medida el acceso de los habitantes a las oportunidades que ofrece la ciudad en materia de empleo, educación, salud, esparcimiento, entre otras cosas. Los últimos años, el sistema de transporte público se presenta como un elemento clave que limita el desarrollo humano de la población venezolana y el desarrollo económico de la ciudad, [10]. El escenario político-económico venezolano ha agudizado una crisis en diversos sectores de la vida urbana, siendo uno de los servicios básicos de primera necesidad más afectados el transporte, impactado severamente el ritmo de vida urbano de la ciudadanía, hasta el punto que una parte de la población ha tenido que recurrir a medios inseguros e inhumanos para poder desplazarse y la otra a abandonar el derecho a realizar sus actividades en la ciudad.

Los costos operativos para prestar el servicio de transporte público en las ciudades venezolanas son insostenibles, los choferes tienen un ingreso regulado por las tarifas fijas, mientras que los gastos de mantenimiento son impredecibles debido a que la economía del país se mueve, en muchas áreas, con divisas a precios del mercado negro. Mientras la población padece los efectos de esta crisis con un pasaje inestable, la carencia de dinero en efectivo para cancelar la tarifa está presente y ha tendido a agravar la situación por los conflictos diarios entre conductores y usuarios, padeciendo largos tiempos de espera para trasladarse; mediciones recientes estiman que la situación tenderá a empeorar, [11].

Esta situación que está atravesando el transporte público en las ciudades venezolanas se ve reflejada en la ciudad de Valencia, capital del estado Carabobo, donde los hogares más pobres de la ciudad se asientan generalmente en la periferia ya que allí los gastos de vivienda y servicios son más bajos; pero en contraposición, deben asumir un alto e imprescindible costo del transporte. Todo está generando consecuencias insostenibles de convivencia urbana impidiendo a sus ciudadanos las libertades de desplazamiento para realizar sus actividades básicas y cubrir sus necesidades primarias para su desarrollo, siendo en los momentos actuales una de las más importantes la búsqueda de alimentos, por lo que se considera que tal situación atenta contra los postulados de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [12], ya que la falta de medios de transporte limita de forma directa el derecho a la ciudad como derecho humano.

Los traslados diarios representan al mes aproximadamente entre un 40 % a 50 % del salario mínimo integral. El fenómeno se agudiza día a día, por su parte la dirección de transporte del Instituto Autónomo De Transporte y Tránsito (IAMTT) de Valencia, informa el abandono del servicio de aproximadamente un 60 % de unidades de transporte público, por lo que el problema ahora no es solo aumentar la tarifa [13].

Por lo que, implantar la modalidad de desplazamiento en bicicletas podría ser parte de la solución a la problemática del transporte. Sin embargo, la falta de una infraestructura óptima (ciclovías) para la circulación de los ciclistas pone en peligro la seguridad de estos [14], debido a que actualmente tendrían que compartir las mismas vías de circulación con vehículos a motor, tales como: vehículos particulares, motos, camiones, entre otros, y al no tener formalmente establecidos los espacios, señales y dispositivos de control de tránsito para los modos no motorizados de transporte corren el riesgo de ser arrollados. Por esto, los posibles usuarios atraídos de este medio

de transporte, no saldrían si las condiciones de la infraestructura no les brindan seguridad, por lo que algunos ciclistas que circulan actualmente optan por no circular en vías principales con un flujo elevado de vehículos a motor, otros circulan a riesgo. Es por esto que implantar este modo de transporte requerirá un tratamiento técnico-político y la formulación de una política pública local que planifique, gestione y regule el uso de este modo de transporte alternativo.

3. Materiales y métodos

El desarrollo de la investigación describe y analiza las etapas de la planificación para el uso de ciclovías dentro de un contexto multidisciplinario, donde intervienen aspectos institucionales, legales, de ingeniería, ambientales, educativos y divulgativos, planteados en el diagrama metodológico.

En la Figura 1 se presenta el Diagrama Metodológico para la Planificación de Transporte No Motorizado (TNM).

La investigación se desarrolla en cinco (5) etapas: en la etapa I, se delimitó el área de estudio, en la etapa II, se realizó un proceso de revisión y recopilación de información básica documental, levantamiento de campo (recorridos de vías urbanas, generadores de viajes en bicicletas, capacidad vial, accidentalidad) y de planes de transporte locales existentes, en la etapa III, se realizó el estudio de demanda utilizando herramientas cuantitativas de análisis estadístico aplicadas en trabajo de campo, en la IV etapa se procedió a seleccionar las rutas con mayor grado de factibilidad de implantación a través de una matriz que evaluó cuatro (4) aspectos: conectividad, factibilidad física, nivel de riesgo, accidentalidad y continuidad; por último en la etapa V, se elaboró el diseño geométrico de la red troncal de ciclovías seleccionadas.

3.1. Delimitación del área de estudio

El ámbito geográfico del área de estudio está representada por los Municipios: Valencia, Los Guayos, y Naguanagua que forman parte del Área Metropolitana de Valencia-AMV, se encuentra situada en la Región Central de Venezuela, aproximadamente 160 kilómetros al oeste de la capital de la República, en el centro del estado Carabobo. Los mismos están conurbados y presentan buena conectividad a través de corredores viales existentes, los cuales son atractores de viajes en transporte público y peatonal. Los aspectos a considerar para el desarrollo de una red troncal de transporte no motorizado, tomó en consideración las etapas de crecimiento futuro de la Línea 1 y 2 del Sistema de Transporte Masivo con metro ligero, su red de rutas troncales alimentadoras, para desarrollar un sistema de pistas para bicicletas en la ciudad, que surge de la necesidad de facilitar y hacer más segura la creciente movilización de grupos sociales de usuarios potenciales de escasos recursos, que requieren de un sistema confiable e inclusivo de transporte, el cual pudiera integrarse con los sistemas modales existentes y planificados a futuro.

3.2. Levantamiento de campo

En esta fase se hizo una revisión exhaustiva de toda la información disponible, además de un reconocimiento preliminar del área de estudio mediante recorridos de vías urbanas, localización de los principales generadores de viajes en bicicletas, consultas en la comunidad y estudio del mercado de las bicicletas, además de capacidad vial, accidentalidad, y de planes de transporte locales existentes.

3.3. Estudio de la demanda

En esta etapa se realizaron entrevistas que permitieron conocer los usuarios potenciales de la bicicleta. La aplicación de una encuesta en el domicilio o lugar de residencia (O/D) representó uno de los principales medios de levantamiento de información básica para el conjunto de herramientas de planificación y estimación de las principales características socioeconómicas y de movilidad. En términos generales, la encuesta en el domicilio tuvo como objetivo fundamental, investigar las interrelaciones entre los aspectos socioeconómicos con las actividades que se desarrollan dentro de los espacios geográficos objeto del área de estudio, con el propósito de



Figura 1: Diagrama Metodológico para la Planificación de Transporte No Motorizado, (TNM)

determinar el comportamiento de indicadores de transporte y su relación con el resto del entorno urbano.

3.4. Evaluación de alternativas

En esta etapa se procedió a seleccionar las rutas con mayor grado de factibilidad de implantación a través de una matriz que evaluó cuatro (4) aspectos: conectividad, factibilidad física, nivel de riesgo, accidentalidad y continuidad.

Así mismo, se desarrollaron los criterios para la planeación y selección de los ejes que conformaron la red de vías para uso de bicicletas. Se planificó un sistema compuesto de una red principal (Troncal) y una secundaria (Alimentadora), estas permitirán a los usuarios movilizarse y conectarse a modos de transporte alterno y complementario al sistema de transporte convencional (autobuses, metro). El trazado requirió de recorridos y observaciones de campo que sirvieron para evaluar los niveles operativos del trazado, prever y minimizar los riesgos a los ciclistas en tramos rectos entre otros aspectos.

Se dio tratamiento especial en las intersecciones, así como en zonas vulnerables conflictivas o críticas, contemplando todos los aspectos de seguridad vial y los posibles polos generadores de ocurrencia de accidentes o puntos negros del sistema vial, lo que permitió considerar medidas para mitigar los posibles impactos al poner en servicio una vía para ciclistas. Las rutas ciclísticas preliminares seleccionadas se clasificaron en tres tipologías de ejes:

a) ejes principales troncales,

b) ejes secundarios alimentadores,

c) ejes secundarios recreativos.

3.5. Diseño geométrico de la red seleccionada

En esta etapa se procedió a realizar la evaluación solo de los ejes principales a través de una matriz, lo que permitió seleccionar los ejes que conformaron la Red Troncal. La matriz definió las prioridades que facilitaron la selección y definición de ejes preliminares propuestos en la red troncal cicloviaria evaluada, los criterios adoptados midieron cuatro factores o aspectos relevantes: conectividad, factibilidad física o espacio, nivel de riesgo o accidentalidad, continuidad de acceso áreas residenciales y comerciales, se estableció un nivel de valores para cada condición de ocurrencia, alto, medio y bajo de cada factor, lo que facilitó la toma de decisión para la selección de los ejes troncales. Se elaboró el diseño geométrico de la red troncal de ciclovías seleccionadas y sus elementos básicos de ingeniería de tránsito:

a) Clasificación de vías según su volumen,
b) Anchos de diseño recomendados,
c) Tipo pistas y canales para ciclistas,
d) Tratamiento a las intersecciones y paradas de transporte público,
e) Terminales y estacionamientos,
f) Paisajismo,
g) Pavimentos.

4. Presentación y discusión de resultados

Los resultados del estudio de la demanda a través de la implementación de las encuestas origen y destino (O/D) determinaron varios aspectos del patrón del viaje, siendo uno de los más resaltantes, el elevado porcentaje de aceptación (más del 50 %) de la población hacia la implantación de ciclovías como medio de transporte complementario en el AMV, además, esta aceptación por parte de los usuarios estuvo condicionada en construir las mismas segregadas y con elementos de protección para su uso.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de esta fase.

Tabla 1: Resultados del estudio de demanda del uso de bicicletas

Zonas / Año	Número de hogares	% Aceptación de uso de bicicletas
Área Metropolitana Valencia, 2016 (1)	1000	42
Municipio Valencia Rafael Urdaneta, 2016 (2)	250	92

Fuente:
(1) Estudio IAMTT, Plan de Naciones Unidas para el Desarrollo-Fondo Medio Ambiente Mundial (PNUD-GEF).
(2) Briceño R.

4.1. Evaluación de alternativas

La evaluación solo de los ejes principales a través de una matriz, permitió seleccionar los ejes que conformaron la Red Troncal. Los resultados obtenidos de los factores evaluados conectividad, factibilidad física o espacio, nivel de riesgo o accidentalidad, continuidad de acceso áreas residenciales y comerciales se valoraron de acuerdo a las condiciones de ocurrencia alto, medio y bajo de cada factor.

La Tabla 2 representa los resultados obtenidos para el factor conectividad o conexión de zonas referido al grado o bondad que tiene una vía para acceder hacia áreas específicas o puntos de generación de viajes.

Tabla 2: Resultados del estudio de conectividad o conexión a zonas generadoras de viajes

Nivel	Escala	Observación	Valor
Bajo	B	Desplazamiento deficiente en tramos.	1
Medio	M	Desplazamiento interrumpido en tramos	2
Alto	A	Desplazamiento continuo en todo el tramo	3

La Tabla 3 representa los resultados obtenidos para la factibilidad física para implantación referida a la capacidad de anchos disponibles en retiros o laterales de la vía, en la isla central, o en laterales de la calzada existente que facilite la implantación de ciclovía.

Tabla 3: Resultados del estudio de factor factibilidad física para implantación

Rango de valores obtenidos	Factibilidad de implantación
4 – 6	Baja Factibilidad (B)
7 – 10	Media Factibilidad (M)
11 – 12	Alta Factibilidad (A)

La Tabla 4 representa los resultados obtenidos para el factor de riesgo, el cual evalúa la tasa de ocurrencia de accidentes por año.

La Tabla 5 representa los resultados obtenidos para el factor continuidad referida como la capacidad de un eje vial de permitir al usuario, el desplazamiento continuo en red, entre igual o diferentes tramas viales, hacia áreas específicas, residenciales, comerciales y educativas

En la Tabla 6 se presentan las 11 rutas seleccionadas las cuales arrojaron valores más altos a partir de 8 puntos de factibilidad de implantación.

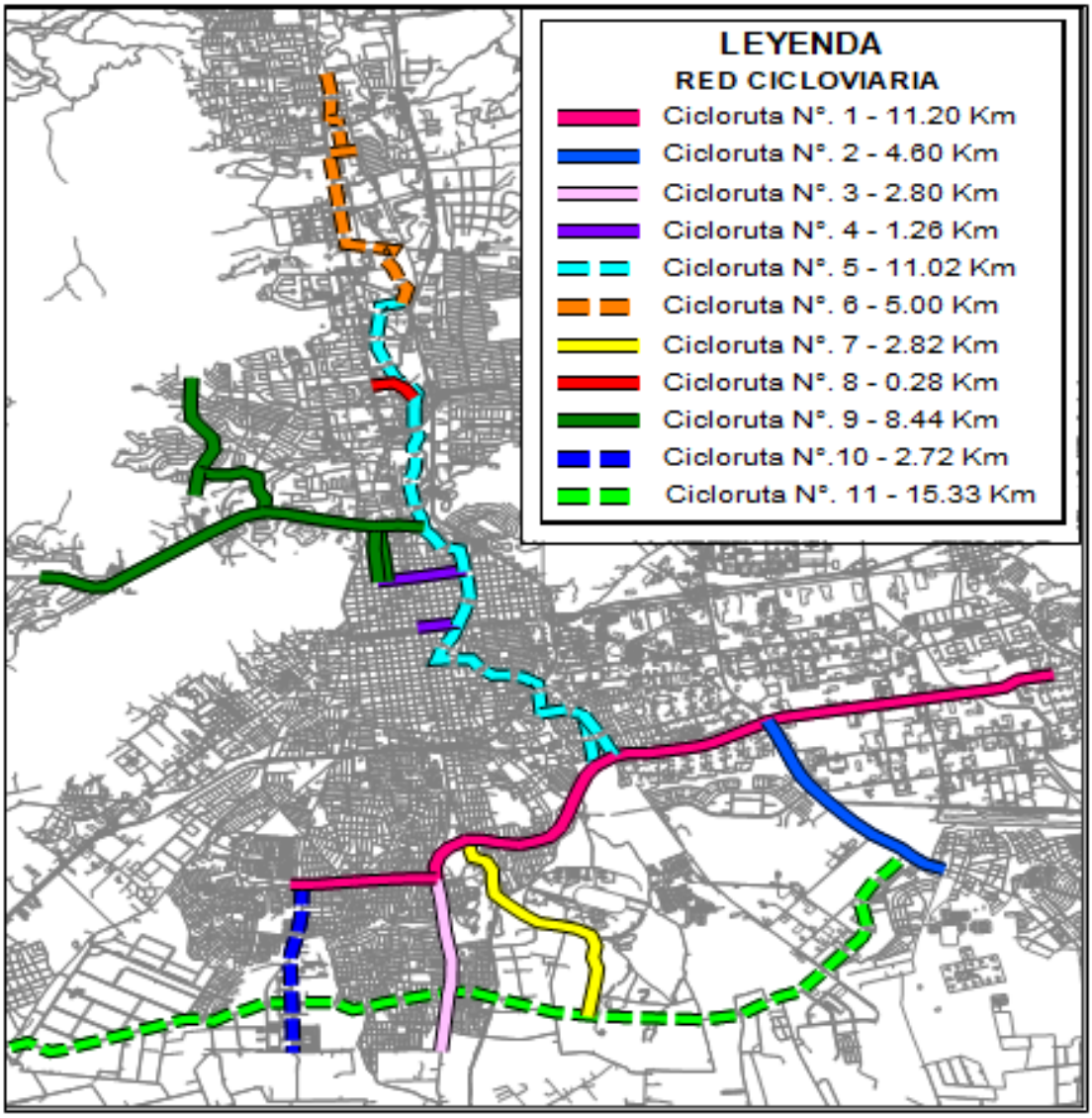


Figura 2: Red Troncal de 11 ciclovías propuestas en el AMV

Tabla 4: Resultados del estudio del nivel de riesgo y accidentalidad

Nivel	Escala	Observación	Valor
Bajo	B	Ocurrencia de al menos 1 accidente.	3
Medio	M	Ocurrencia entre 2 y 4 accidentes.	2
Alto	A	Ocurrencia de 5 o más accidentes.	1

Tabla 5: Resultados del estudio de continuidad

Nivel	Escala	Observación	Valor
Bajo	B	Grado de conexión bajo	1
Medio	M	Grado de conexión medio	2
Alto	A	Grado de conexión alto	3

Este proceso de valoración de factores permitió seleccionar.

La Figura 2 muestra el planteamiento del diseño geométrico de la red troncal de 64 km de ciclovías.

Una vez evaluados y totalizados los 4 factores para cada eje troncal, de procedió a definir los rangos de valores que determinan la factibilidad de

Tabla 6: Matriz de ponderación para la selección rutas en el AMV

Ruta	Conectividad	Factibilidad física	Accidentalidad	Continuidad	Valor
1	A = 3	A = 3	M = 2	A = 3	11
2	M = 2	A = 3	M = 2	M = 2	9
3	M = 3	M =2	M = 2	M = 2	9
4	M = 2	M = 2	M = 2	M = 2	8
5	A = 3	A = 3	M = 2	A = 3	11
6	A = 3	A = 3	M = 2	M = 2	11
7	A = 3	A = 3	B = 3	B = 1	11
8	A = 3	A = 3	B = 3	A = 3	12
9	A = 3	A = 3	B = 3	A = 3	12
10	M = 2	B = 2	B = 3	A = 3	10
11	A = 3	A = 3	B= 3	A = 3	12

implantación para la toma de decisiones y selección de estos.

La Tabla 7 presenta los resultados para los rangos de valores obtenidos para la implantación.

Tabla 7: Resultados del estudio de rangos de valores de implantación

Nivel	Escala	Observación	Valor
Bajo	B	Sin capacidad	1
Medio	M	Capacidad calzada existente	2
Alto	A	Capacidad en retiros / isla central / calzada	3

4.2. Diseño geométrico de la red Troncal

Los resultados arrojados de la clasificación de vías según su volumen se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Clasificación de ciclovías según su volumen

Cantidad de bicicletas /día	Volumen
0-120	Bajo
121-250	Medio
250 o más	Alto

La clasificación de anchos de diseño recomendados se muestran en la Tabla 9.

Los resultados según el tipo de pistas y canales para ciclistas son los siguientes: el trazado contempla dos tipologías de ejes en el sistema

Tabla 9: Anchos de diseño recomendados

Ciclovías o ciclo pistas (fuera de calzada) Unidireccionales AMR (Ancho Mínimo Recomendable)			
1 pista		2 pistas	
AMR	Ancho ideal	AMR	Ancho Ideal
1,00	1,20	2,00	2,20
Ciclocanal o ciclo carril (dentro de calzada) Unidireccional			
1 pista		2 pistas	
AMR	Ancho ideal	AMR	Ancho Ideal
1,00 + 0,25 rayado	1,2 + 0,25 rayado	1,8+0,25 rayado	2,0+0,25 rayado

1) Ciclovía o Ciclopista, en el caso de que se implante en espacio físico en los laterales del Corredor, fuera de la calzada o, dentro de espacios en la isla central de la vía, construyéndose un canal exclusivo independiente y separado del tránsito automotor. Las Figuras 3 y 4 muestran estos resultados.



Figura 3: Eje 2. Vía Flor Amarillo (Lo06)

2) Ciclocanal o ciclocarril en el caso de que la implantación sea en un canal delimitado y demarcado dentro de la calzada. La Figura 5 muestra este resultado.

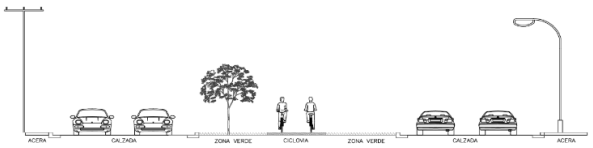


Figura 4: Eje 7. Av. Principal Hipódromo enlace Plaza de Toros

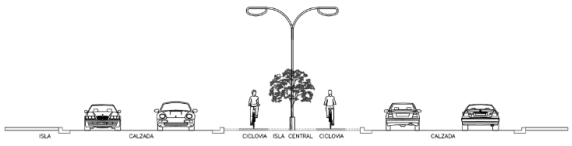


Figura 5: Eje 1. Sesquicentenario-Av. Libertador

En ambas tipologías aunque el canal sea segregado, se debe contar con los elementos mínimos de seguridad a fin de resguardar y preservar la integridad del ciclista.

En la ciudad de Valencia se logró vincular e integrar centros de generación de viajes de los sectores populares residenciales tales como los sectores al sureste de Flor Amarillo, Ciudad Plaza, zonas alrededores Parque Recreacional e Hipódromo, al suroeste en Av. Libertador-Sesquicentenario–Av. Aránzazu con las zonas de atracción de viajes comerciales, industriales y educativas que constituyen los viajes origen – destino de mayor frecuencia en la red. La Figura 6 presenta este caso.

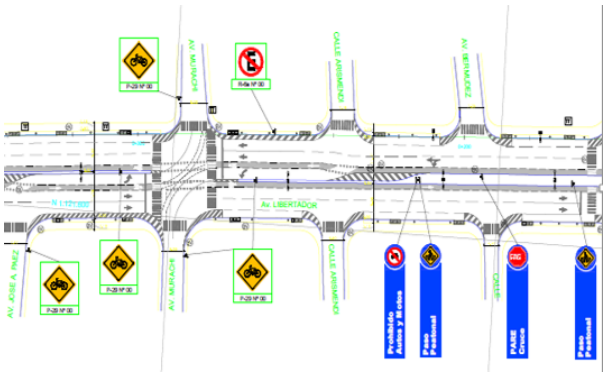


Figura 6: Eje 4. Tramo de Av. Libertador enlace Plaza de Toros, esquema funcional

Para el tratamiento a las intersecciones y paradas de transporte público, el diseño en las intersecciones consideró criterios de seguridad y confort para los ciclistas, tomando en cuenta el tipo de vía y las caracterizaciones del tráfico. Los criterios son los siguientes: Excelente visibilidad recíproca, es decir, que el ciclista pueda ver cualquier vehículo con tiempo suficiente para detenerse, y uso apropiado de las señalizaciones horizontales y verticales. Se puede observar esta situación en la Figura 7.

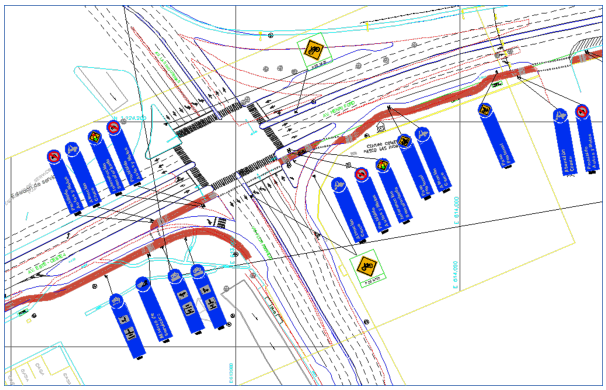


Figura 7: Intersección Henry Ford con Humberto Celli, Zona Industrial Norte

En cuanto a los terminales y estacionamientos se diseñó la infraestructura necesaria para crear las condiciones operativas que estimulen el viaje modo dual, donde se atraiga a la gente a combinar los viajes de bicicleta con el transporte público y el metro, esto permitiría aumentar el rango del recorrido en bicicleta. Un gran porcentaje de la población de escasos recursos está residenciada en la zona sur de la ciudad y la mayoría trabajan a distancias aceptables para cicloandantes (7 a 15 km). Por lo que se diseñó una biciestación con capacidad para 120 paraciclos y 12 bicitaxis, ubicada en la adyacencia de la estación del metro Plaza de Toros, cuya finalidad es ofrecer unidades en alquiler, servicios de bicitaxis y estacionamiento de reguardo de bicicletas. Este diseño se muestra en la Figura 8.

El paisajismo y servicios son imprescindibles por la importancia de un ambiente agradable y atractivo a la vista es un factor que se considera motivador a los usuarios de este medio de transporte. El ciclista se siente más identificado y comprometido con el medio o entorno de las ciclovías. La ornamentación y la vegetación en concordancia con el ambiente de la ciudad hacen

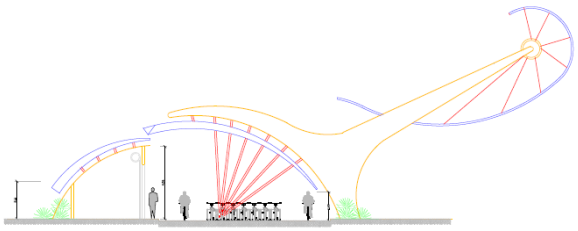


Figura 8: Biciestación Plaza de Toros-Metro Valencia, Arq. J.M Fernández

más habitables las zonas urbanas y potencia el uso de las ciclovías. El proyecto contempló la siembra de 4000 arbustos, donde solo se sembraron 150 en el tramo construido en el eje troncal 1 de la red. En cuanto los pavimentos para una ciclovía deben poseer una superficie uniforme, impermeable, antideslizante y de aspecto agradable. Por no estar sometidos a grandes esfuerzos su estructura no requerirá de diseños exigentes. Lo que es muy importante es que la ciclovía produzca una diferencia visual a las otras vías adyacentes, lo que permitirá a esto ser el mayor recurso para su señalización. Los pavimentos propuestos fueron en su mayoría de asfalto y pocos tramos en concreto, el uso de adoquines no es recomendable ya que su uso produce vibraciones a los cicloandantes.

5. Conclusión

La experiencia presentada en la investigación, demuestra que la planificación de ciclovías requiere de la elaboración de proyectos por parte de expertos donde no solo se debe evaluar la demanda potencial usuaria, sino su factibilidad de implantación que permita determinar las condiciones de viaje seguro y confortable con facilidades de interconexión e integración a otros modos de transporte en la ciudad, por lo que la ingeniería de tránsito juega un papel importante en el proceso.

En el AMV se planificó y diseñó una de Red Troncal de Ciclovías de Longitud aproximada de 64 km con ingeniería de detalle de la cual solo se construyeron 7 km, los que actualmente operan en forma deficiente ya que no se construyó la biciestación que permitiría la integración operativa con otros modos de transporte (metro, autobús) en la estación del metro Plaza de Toros.

De lograr posicionar la bicicleta como medio de transporte en la ciudad de Valencia, se contemplan beneficios: ambientales como mejoras a la calidad de aire y reducción de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, económicos como el ahorro de combustible, sociales como el ahorro del tiempo de viaje y, beneficios urbanos como el mejoramiento del espacio público lo que se traduce en mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Construir infraestructura no es suficiente para motivar a los ciudadanos a utilizar este medio de transporte. Brindar la seguridad que exige el ciclista urbano se mide en términos de integridad personal, pero también en la certeza de contar con infraestructura adecuada para un tránsito seguro en toda la red, que incluye estacionamientos para bicicletas, ubicados en los espacios públicos y en las edificaciones gubernamentales, académicas, centros comerciales entre otros.

6. Recomendaciones

Es necesario ofrecer a las comunidades programas educativos y normas el uso de bicicletas como medio de transporte, además las autoridades deben proporcionar las condiciones para un viaje seguro y cómodo en bicicleta, logrando un nivel de mantenimiento y servicio satisfactorio en la red propuesta. La correcta segregación de las pistas destinadas a la bicicleta es el punto principal para transitar seguro en cualquier parte donde exista una ciclovía. Utilizar un criterio unificado para el diseño de ciclovías y ciclocanales (señales, color de la banda, semáforos) en el AMV, esto facilitaría el desplazamiento de los ciclistas y la interacción de estos con otros medios de transporte. Reducir la demanda de viajes en general o en determinados lugares por la implementación de una política de precios, estrategias de uso de la tierra, la política de estacionamiento o las restricciones a la capacidad del sistema (tarificación urbana).

La exclusión de la circulación de automóviles de la ciudad o de los centros urbanos favoreciendo las zonas comerciales peatonales (peatonalizar corredores viales o construir ejes verdes). Dedicar

espacios viales a usuarios específicos, por ejemplo, canales para uso exclusivo para autobuses (BRT), flotas de bicitaxis o bicicletas, ejes verdes peatonales.

7. Referencias

[1] M. Díaz, "La bicicleta en la movilidad cotidiana: experiencias de mujeres que habitan la Ciudad de México," *Revista Transporte y Territorio*, vol. 16, pp. 112–126, 2017.

[2] Instituto Autónomo Municipal de Tránsito y Trasporte Valencia (IAMTT), *Estudio Integral de Transporte Público del Área Metropolitana de Valencia (EITTAMV, expandido 2005-2019)*, Carabobo, Venezuela, 2019.

[3] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), "Ciclo-inclusión en América Latina, guía para impulsar el uso de la bicicleta como transporte urbano," Reporte técnico, 2015.

[4] V. A. Muñoz Sotomayor, "Diseño de Ciclovías para Ciudades Intermedias, una propuesta para Loja, Guayaquil, Universidad Internacional del Ecuador," *INNOVA Research Journal*, vol. 1, no. 12, pp. 11–22, 2016.

[5] G. Isunza, *Movilidad Urbana: Dimensiones y Desafíos*. México: Editorial Colofón, 2017.

[6] C. Miralles, *Transporte y Ciudad El binomio imperfecto*. Barcelona: Ariel Geografía, 2002.

[7] A. Jakovcevic, P. Franco, M. Visona, D. Pozzaa, y R. Ledesma, "Percepción de los beneficios individuales del uso de la bicicleta compartida como modo de transporte," *Suma Psicológica*, vol. 23, no. 1, pp. 33–41, 2016.

[8] Y. Dávila, Z. Bolívar, y C. Criollo, " Caracas a Pedal: Aportes para un Cambio en la Movilidad Urbana Caraqueña," en *Ciudad y Sociedad (CS-18), Trienal de Investigación,FAU UCV 2017*, Caracas, Venezuela, 2017.

[9] Centro de Estudios sobre Redes, Transportes, Urbanismo y Construcción Pública CERTU, "Los esquemas de ciclovías y la intermodalidad bicicletas y transportes públicos," en *BoletinFAL, Facilitación del Transporte y el Comercio en América Latina y El Caribe*, 317 ed. CEPAL, Enero 2013, no. 1.

[10] I. Villegas, "Movilidad Sostenible Eficiencia Social y Desarrollo," Tesis Doctoral en Desarrollo Sostenible, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2016.

[11] I. Villegas, "¿Existe en Venezuela un transporte público que satisfaga los derechos humanos?" en *XX Congreso Latino Americano de Transporte Público Urbano (CLATPU)*, Medellín, Colombia, 23-26 de julio 2018.

[12] Organización de Naciones Unidas, *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev. 3)*, Santiago, 2018.

[13] Dirección de Transporte, Instituto Autónomo Municipal de Tránsito y Transporte Valencia, *Inventario de flota de transporte*, 2018.

[14] Instituto Nacional de Transporte Terrestre, *Manual Venezolano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (MVDUCT), capítulo 9, ciclovías,*, (INTT), 2011.

Evaluation of the influence of annealing time on the mechanical, electrical and microstructural properties of aluminum alloy AA-8176

Leonel Salazar [a], Kelvyn Matute [a], Luís Sidorovas *[,b]

[a]Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
[b]Centro de Investigación de Materiales CIM, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- Aluminum, an excellent material for electrical applications (almost all high voltage wiring is made from aluminum alloys). It has a high relationship between resistance and weight, corrosion resistance, high electrical conductivity, reflectivity, formability, machinability, non-toxic, and non-magnetic. Due to the current circumstances (Venezuela Country Situation), it is not possible to import raw materials for the manufacture of high quality electrical conductors; therefore it is obtained from a national but lower quality aluminum supplier. A large number of imperfections were observed: metallic (Fe) and non-metallic inclusions (Al_2O_3, SiO_2, $CaCO_3$ and Si), porosities that affect quality, then it is melted and add alloying elements to obtain an alloy adjusted to the quality specifications for the manufacture of electrical conductors. The experimental procedures were carried out according to ASTM B 800-05 and ASTM B standards for the evaluation of annealing on mechanical, electrical and microstructural properties. The material after each annealing time (6, 8, 10 and 12 hours) was characterized, through mechanical and metallographic tests, to determine the influence of the annealing time on the alloy. The longer the annealing, the material became more ductile and its grain size increases. It was established that the alloy must be better refined to obtain a better final product.

Keywords: microstructure; annealing; ultimate effort; elongation; electrical conductivity.

Evaluación de la influencia del tiempo de recocido sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y microestructurales de la aleación de aluminio AA-8176

Resumen.- El aluminio, excelente para aplicaciones eléctricas (casi todo el cableado de alto voltaje se fabrica con aleaciones de aluminio), posee una alta relación entre la resistencia y el peso, resistencia a la corrosión, elevada conductividad eléctrica, reflectividad, formabilidad, maquinabilidad, no-tóxico, ni-magnético. Debido a las actuales circunstancias (Situación País Venezuela), no es posible la importación de materia prima en bobinas de alambrón de diámetro d= 9,5 mm para la fabricación de conductores eléctricos de alta calidad, por lo tanto se obtiene de un proveedor nacional la aleación de aluminio AA 8176 en lingotes, pero con una gran cantidad de imperfecciones: inclusiones metálicas (Fe) y no metálicas (Al_2O_3, SiO_2, $CaCO_3$ y Si), y porosidades que afectan la calidad, luego se funde y se le agregan elementos aleantes para obtener una aleación según las normas de fabricación de conductores eléctricos, con una menor cantidad de imperfecciones, inclusiones y porosidad. A continuación se procesa por deformación plástica y se presenta en rollos de alambrón de 9,5 mm de diámetro y al final se le aplica el recocido de 6, 8,10 y 12 horas y se caracterizó mediante ensayos mecánicos y metalográficos, para determinar la influencia del tiempo del recocido sobre la aleación. A mayor tiempo del recocido el material se hizo hasta un 30 por ciento más dúctil y un crecimiento del tamaño de grano de 30 μm hasta 200 μm para el recocido de 12 horas. Se estableció que debe refinarse mejor la aleación para obtener un mejor producto final.

Palabras clave: microestructura; recocido; esfuerzo ultimo; elongación; conductividad eléctrica.

Recibido: 10 de febrero, 2020.
Aceptado: 10 de abril, 2020.

1. Introducción

Las propiedades que favorecen la selección del aluminio y sus aleaciones son su alta relación entre la resistencia y su peso, su alta resistencia a la corrosión de productos químicos, su elevada conductividad eléctrica, reflectividad,

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*lsidorovas@gmail.com (L. Sidorovas)

formabilidad y maquinabilidad, además no son magnéticos ni tóxicos. Los usos principales del aluminio y de sus aleaciones son la fabricación de contenedores y empaques (latas y hojas de aluminio), edificios y otros tipos de construcciones, en el transporte, herramientas portátiles, productos duraderos y aplicaciones eléctricas (conductor económico y no magnético). Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio [1].

Según Fernández [2] el aluminio y sus aleaciones solo pesan aproximadamente un tercio de volúmenes iguales del hierro, acero o cobre. Con temples apropiados, algunas aleaciones de aluminio igualan o superan la resistencia de algunos aceros. Las aleaciones de aluminio fuerte pueden ser más resistentes que el acero. Del mismo modo Espinoza [3] afirma que el peso tiene mucha importancia en la transmisión de electricidad de alto voltaje a larga distancia, y actualmente se usan conductores de aluminio para transmitir electricidad a potenciales de 700.000 voltios. La producción de cables y alambres a partir de la aleación de aluminio AA-8176, se fundamenta en estándares de calidad: conductividad eléctrica, resistencia a la tensión y porcentaje de alargamiento). Para minimizar la variación en las especificaciones se le aplica un tratamiento térmico de recocido que mejora sus propiedades mecánicas y eléctricas.

La resistencia a la tensión es el esfuerzo ingenieril calculado cuando la carga aplicada alcanza su valor máximo, también se le denomina última resistencia a la tensión (TS) y junto con la fluencia son dos importantes propiedades para el diseño y la manufactura de los materiales. El porcentaje de alargamiento se relaciona con la deformación que sufre el material antes de fallar. Groover [4] lo define como la cantidad de deformación que el material puede soportar antes de romperse, es también una propiedad mecánica de interés en muchos procesos de manufactura. La medida común de esta propiedad es la ductilidad, que es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse. Esta medida puede tomarse ya sea como elongación o como reducción de área.

Como lo enseña Callister [5] en relación a la conductividad eléctrica, este término se utiliza para especificar el carácter eléctrico de un material. Es simplemente el recíproco de la resistividad, indica la facilidad con que un material es capaz de conducir corriente eléctrica. Por otro lado la norma Covenin 452-89 [6] indica que la Resistividad es el valor que expresa el producto de la resistencia eléctrica de un material metálico por su sección transversal, dividido entre su longitud. Así como también, la resistividad volumétrica es el valor que expresa el producto de su resistencia eléctrica por su sección divido entre su longitud y, finalmente la resistividad de masa es el producto de la resistividad volumétrica por la densidad del metal.

Destaca Fernández [2] que el aluminio es un gran sustituto como conductor en reemplazo del cobre, por las características que presenta y además representa un negocio rentable, también determinó en su estudio que las aleaciones tipo 1350 y la serie 8000 son las que poseen mejor conductividad, por esto son las más idóneas para la fabricación de conductores de aluminio de hasta 2000 voltios. Tal vez por estas razones se ha incrementado tanto la fabricación de conductores eléctricos a base de la aleación de aluminio AA-8176.

Mangonon [7] define el recocido como un tratamiento térmico del material con el propósito de aliviar los esfuerzos después del trabajo en frío o en caliente, y para ablandar el material al eliminar el endurecimiento por deformación. La recuperación se aplica para producir alambres de aluminio de alta resistencia para líneas de transmisión eléctrica. La recuperación devuelve la conductividad eléctrica, pero conserva la alta resistencia mecánica que se obtuvo en el trabajo en frío.

La presente investigación se realizó con la finalidad de mejorar la calidad de los conductores eléctricos fabricados con la aleación de aluminio AA-8176, donde se evaluó el efecto del tiempo del tratamiento térmico de recocido, para garantizar las propiedades eléctricas y mecánicas. Los resultados permitieron interpretar, discutir y analizar los datos obtenidos para establecer un tiempo de recocido que permita alcanzar la especificación de la norma ASTM B 800-05 y con el mejor tiempo de recocido, mejorar el proceso de fabricación y disminuir los costos implícitos de producción. Esto permitirá

la fabricación de los conductores eléctricos con un alto estándar de calidad con la materia prima que se consigue en el ámbito nacional, esto incide en la utilidad económica de la empresa y en la política de sustitución de importaciones de materia prima (aleación de aluminio) con lo cual la empresa se posiciona mejor en el mercado nacional e internacional de los productores de conductores eléctricos de esta aleación de aluminio.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación se inicia con una revisión de los fundamentos teóricos que guían este proceso. A continuación se desarrollan las siguientes etapas: adquisición, reformulación y estudio de recocido del material utilizado en la producción de conductores eléctricos.

2.1. Adquisición del material

Como consecuencia de múltiples factores que interactúan entre ellos, como la disponibilidad de dólares para comprar la materia prima importada, asimismo la eficiencia administrativa del Estado y hasta un pretendido bloqueo económico que se enmarcan en la realidad país actual, no se puede obtener la materia prima importada, por lo tanto la empresa se ve en la necesidad de adquirirla de un proveedor nacional, esta aleación es usada para múltiples aplicaciones. El material llega a la empresa en forma de lingotes de aleación de aluminio AA-8176, pero con una gran cantidad de imperfecciones: inclusiones metálicas y no metálicas e impurezas no deseadas, por lo que se funde para ser reformulada para obtener una aleación ajustada para la fabricación de conductores eléctricos.

2.2. Reformulación del Material

El proceso de producción de conductores eléctricos comienza cuando se recibe la materia prima original según el certificado de calidad. Esta es fundida y se le adicionan algunos elementos aleantes como: chatarra (recortes, escoria, producto rechazado, entre otros) y aleantes (boro, hierro, magnesio, silicio, entre otros), esto se justifica porque la materia prima de una calidad limitada debe ser refinada para disminuir el porcentaje de impurezas, porosidades, imperfecciones mecánicas y no mecánicas con el objetivo de obtener una aleación con una formulación propia de calidad mejorada, reformulándola hasta obtener una aleación de aluminio AA-8176 ajustada a los parámetros de la empresa dentro de las especificaciones nacionales e internacionales.

Posteriormente a esta reformulación el material pasa por un proceso de colada continua para después realizar un proceso de fabricación (deformación plástica), donde la barra de aluminio entra con una sección trapezoidal al laminador, pasando por 10 estaciones de laminación en caliente (5 horizontales y 5 verticales) con un baño de trefilina con una concentración mayor al diez por ciento, saliendo con sección circular para luego pasar por un túnel de enfriamiento con agua y aire donde al final el recogedor se encarga de enrollar el alambrón formando la bobina de material, que se presenta en forma de rollo de alambrón con un diámetro de 9,5 mm, en bobinas de 2 toneladas y una densidad a 20 °C de 2,71 g/cm³ (Figura 1).

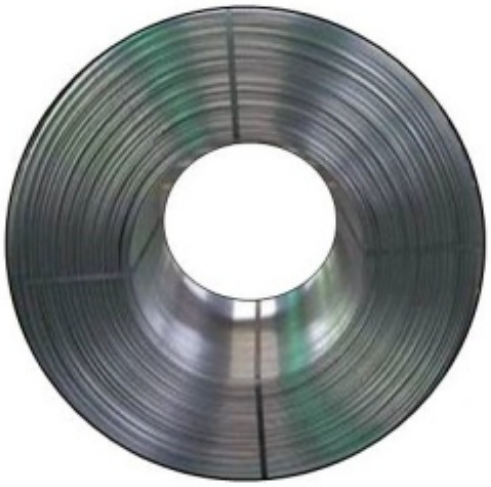


Figura 1: Presentación de alambrón de aluminio AA-8176.

En esta fase, al material sin tratamiento térmico de recocido, se le toma la muestra de la punta interna (PI) al inicio del rollo de alambrón y de punta externa (PE) al final del rollo, con una longitud de 35 cm para asegurar que la sección medida entre las mordazas para las muestras sea de

25 ± 1 cm para obtener las propiedades mecánicas (carga de rotura y porcentaje de alargamiento). A continuación se fabricaron las probetas para la aleación AA-8176 en su estado original (Sin tratamiento Térmico de Revenido) para los ensayos de conductividad eléctrica, esfuerzo y elongación según las especificaciones.

Se fabricaron las probetas en su condición inicial para el ensayo de tracción y de resistencia eléctrica, para la medición del diámetro de la probeta de tracción (9,5 mm) se utilizó un tornillo micrométrico digital Marca: Mitutoyo. Modelo: TM-500. Las probetas para los ensayos se pesaron en una balanza digital, marca: FAIRBANKS, modelo: FLM 0402, Capacidad: 5 kg. Apreciación de 0.001g. A continuación con estos datos se realizaron los cálculos pertinentes. La resistencia eléctrica se midió en un puente Kelvin (Figura 2).



Figura 2: Puente Kelvin Marca: Aesa Cortaillod, Modelo 7106.

Luego mediante el ensayo de tracción según la norma ASTM B 557 [8], en una máquina universal de tracción marca: YUE HUA TEC, modelo YH (Figura 3), previamente se determina el diámetro promedio según procedimiento interno. Del mismo modo se tomaron las muestras del material no tratado para determinar las propiedades eléctricas (conductividad o porcentaje de IACS) según el procedimiento interno de la empresa fundamentado en las Normas ASTM B 557 y B193-02 [9], que consiste en tomar una muestra con una longitud de 156 ± 1 cm para ser montada en un equipo puente de Kelvin marca: AESA CORTAILLOD, modelo 7106 (Figura 2)

La composición química de la aleación aluminio AA-8176 se obtuvo mediante un espectrómetro marca: SPECTROLAB, modelo: M6375 (Figura 4), tipo emisiones ópticas, programa: software



Figura 3: Máquina universal de tracción marca: YUE HUA TEC, modelo YH.

1.20, este equipo permite obtener el porcentaje en masa de cada uno de los metales presentes.



Figura 4: Equipo de espectrometría de emisiones óptica Spectrolab.

Se asume el aluminio AA-8176 como un material homogéneo en toda la longitud del

rollo de alambrón que se somete al tratamiento térmico de recocido, donde los resultados de sus características: esfuerzo último, elongación y conductividad eléctrica entre las muestras de la punta externa (PE) y la punta interna (PI) presentan una leve variación en los valores, se puede considerar que el material es uniforme.

2.3. Estudio de Recocido

El material se somete a un tratamiento térmico de recocido para garantizar los estándares de calidad del producto nacional y de exportación. Las especificaciones del aluminio AA-8176 se muestran en las Tablas 1, 2, 3 y 4. El tratamiento consistió en colocar cuatro bobinas del material dentro de un horno Marca: CANEFCO. Modelo: 3 a una temperatura entre los 500-520 °C, donde se realizó el tratamiento térmico de recocido con periodos de tiempo correspondientes a 6, 8, 10 y 12 horas respectivamente; después del recocido se tomaron las muestras en cada uno de los rollos para ser caracterizadas y determinar las propiedades mecánicas y eléctricas en sus diferentes tiempos de recocido.

Tabla 1: Composición química de la aleación de aluminio AA-8176 [8].

Material	Porcentaje en peso
Silicio	0,03 – 0,15
Hierro	0,40 – 1,0
Cobre	-
Magnesio	-
Zinc	0,10
Boro	-
Otros elementos	0,15
Aluminio	Resto

Tabla 2: Propiedades atómicas del aluminio [10, 9].

Número atómico	13,0000
Estructura cristalina	FCC
Peso atómico	26,9815 g/mol
Valencias indicadas	3,0000

Se asumen las especificaciones de calidad del producto de la empresa fabricante de conductores eléctricos por ser las características que definen el producto a partir del aluminio AA-8176. Los criterios de calidad del producto se presentan en la Tabla 5.

Tabla 3: Propiedades Eléctricas [11].

Conductividad Eléctrica a 20 °C	35 m Ω^{-1} mm^{-2}
Resistividad eléctrica a 20 °C	0,0286 $\mu\Omega$ mm^2 m^{-1}
Coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica entre 1 y 100 °C	0,0040 K^{-1}
Densidad de corriente límite	102 A/mm²
Densidad de corriente de fusión	1910 A/mm²
Densidad del Al	2,7 g/cm^3

Tabla 4: Propiedades Mecánicas Promedios [12].

Módulo de Elasticidad (E)	71,7 GPa
Módulo de Rigidez (G)	26,8 GPa
Razón de Poisson (ν)	0,34

Tabla 5: Criterios de calidad del producto.

	Diámetro (mm)	Conductividad eléctrica. (%IACS)	Esfuerzo último (kgf/mm^2)
Antes	9,5 ± 0,5	N/A	10 – 12
Despues	9,5 ± 0,5	60,6 Mínimo	6,0 – 8,5
Exportación	9,5 ± 0,5	> 60	6,0 – 9,0

2.3.1. Microscopia óptica y electrónica de barrido

La Microscopia Óptica y Electrónica de Barrido fue realizada en el Laboratorio de Metalografía de la Universidad Simón Bolívar (USB), los procedimientos para la preparación de las probetas como desbaste, pulido y ataque se realizaron según las normas ASTM E3-01 [13] y ASTM E 407-07 [14]. Se dispusieron las muestras y estas fueron embutidas en baquelita para el ensayo de metalografía. Para el desbaste grueso de las

probetas se utilizó una desbastadora gruesa marca: LECO, modelo: BG-30 con lija de banda de 80 grit y en el desbaste fino se procedió a lijar con desbastadora fina marca: LECO, modelo: DS-20 con lijas de: 240, 320, 400 y 600 grit. (Figura 5)



Desbaste grueso



Desbaste fino

Figura 5: Pulidora de desbaste.

Finalmente se le realizó un pulido tipo espejo con lija rotatoria (1200 grit), y un acabado con pasta de diamante (1 micrón) en una pulidora marca: BUEHLER, modelo: Beta - Twin Variable Speed Grinder Polisher. Como reactivo se usó ácido fluorhídrico al 24 por ciento durante 30 segundos de exposición.

Para el estudio de microscopia óptica, se utilizó un microscopio óptico marca: OLYMPUS, modelo: PMG3 y para la microscopia electrónica de barrido un microscopio electrónico de barrido Marca: JEOL, Modelo: JSM-6390, con ampliaciones desde 100X a 8000X (Figura 6).



Microscopio óptico



Microscopio electrónico de Barrido

Figura 6: Microscopio utilizados.

3. Análisis y discusión de los resultados

La composición química de la aleación aluminio AA-8176 reformulada sin procesar, se obtuvo mediante espectrometría de emisiones óptica en un equipo marca SPECTROLAB (Figura 4), arrojando los resultados, según Tabla 6.

Tabla 6: Composición química del aluminio AA-8176 (Colada 1098).

Porcentaje en peso				
Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0,083	0,41	0,001	0,005	0,006
Ti+V	Ca	Ga	Li	Na
0,002	<0,0001	0,007	-	<0,0001
Cr	Ni	Zn	Ti	B
<0,0001	0,003	0,006	0,002	0,002
Pb	Sn	Sr	V	Al
0,002	0,002	-	0,0006	99,47

En la Tabla 7 se presenta la comparación de la composición química del producto con la composición requerida por la norma ASTM B 800-05 y por la norma interna de la empresa y su respectiva correspondencia [15].

Tabla 7: Comparación de la composición química.

Elemento	Porcentaje en peso		
	Producto	ASTM B800-05	Norma Interna
Si	0.083	0,03-0,15	0,03-0,10
Mg	0,006	-	-
Fe	0,41	0,40-1,0	0,40-0,42
Ga	0,007	0,03 Max	0,02 Max.
Ti+V	0,002	*	0,02 Max.
B	0,002	-	-
Cr	< 0,0001	*	0,003 Max.
Zn	0,006	0,10	0,03 Max.
Mn	0,005	*	0,006 Max.
Ni	0,003	*	0,02 Max.

La sumatoria de las composiciones químicas restantes, marcadas con un asterisco * no debe sobrepasar el 0,15 por ciento de la composición total.

Caicedo y Murgía [16] concluyeron en su investigación que el proceso de producción (colada, trefilación y tratamiento térmico) se inicia en el monitoreo y control de las variables, mantener los factores significativos en los rangos propuestos asegura el proceso uniforme. El control de proceso como un objetivo de calidad, con acciones preventivas, correctivas y/o de mejoramiento antes de que originen problemas en el producto final es de vital importancia. Se requiere un excelente

refinado y también el control del proceso que minimice las pérdidas y el reproceso (producto no conforme) para asegurar la calidad del producto en el tratamiento térmico.

Los resultados obtenidos para las muestras sin tratamiento térmico de recocido se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Resultados obtenidos de las muestras sin tratamiento.

	PE	PI
Carga Última (kgf)	826,60	847,78
Alargamiento (mm)	39,90	38,69
Resistencia Eléctrica (Ω/km)	0,41	0,40
Diámetro (mm)	9,47	9,50
Masa (g)	296,96	299,47

Los resultados obtenidos para la punta interna y la punta externa del esfuerzo último, elongación y conductividad eléctrica se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Datos promedios de los ensayos mecánicos y eléctricos.

	PE	PI
A (mm^2)	70,24	70,84
σ_U (Kgf/mm^2)	11,77	11,97
δ (%)	15,28	15,80
CE (% IACS)	60,52	60,51

3.1. Tratamiento térmico de recocido

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 10, 11 y 12.

Tabla 10: Datos obtenidos de los instrumentos.

Tiempo recocido (Horas)	Carga Ultima (kgf)		Alargamiento δ (mm)	
	PE	PI	PE	PI
6	569,72	634,32	91,58	78,67
8	559,80	597,03	94,49	94,91
10	567,27	571,64	99,07	101,99
12	536,04	566,1	97,41	107,40

Tabla 11: Datos obtenidos de los instrumentos.

Tiempo recocido (Horas)	Resistencia Eléctrica (Ω/km)	
	PI	PE
6	0,3940	0,3927
8	0,3967	0,3940
10	0,3827	0,3914
12	0,3939	0,3906

Tabla 12: Diámetro y peso de las probetas.

Tiempo recocido (Horas)	Diámetro (mm)		Peso (gf)	
	PE	PI	PE	PI
6	9,63	9,53	296,02	295,60
8	9,48	9,61	295,28	300,00
10	9,63	9,49	302,48	298,50
12	9,59	9,54	302,49	300,52

Después del tratamiento de recocido en los diferentes tiempos de exposición, con los datos obtenidos de los instrumentos se calcula el área de sección (A), el esfuerzo último (σ_U), la elongación (δ) y la conductividad eléctrica (CE) en la PE y PI mostrada en la Tabla 13.

De igual manera se representan las diferencias alcanzadas después del tratamiento térmico a diferentes tiempos de las propiedades eléctricas (conductividad eléctrica) al esfuerzo de rotura y al porcentaje de elongación con respecto a material sin tratamiento térmico, según la Tabla 14.

El comportamiento del material sometido a tratamiento térmico de recocido es consistente con los fundamentos teóricos que rigen la recuperación del material con endurecimiento y de las tensiones internas por deformación que aparecen durante el proceso de fabricación, que pudieran afectar las especificaciones del producto.

De la misma manera como Orsi [17] en un estudio observó al caracterizar dos aleaciones de aluminio, que el aumento de la tensión de fluencia y de rotura está relacionado al endurecimiento por deformación que presentan ambos materiales durante el trefilado, en la Figura 7 se observa como disminuye el esfuerzo último al incrementarse el tiempo de exposición, por la recuperación

Tabla 13: Datos Obtenidos para Tratamiento de Recocido (6, 8, 10 y 12 Horas).

Tiempo recocido	6 Horas		8 Horas		10 Horas		12 Horas	
	PE	PI	PE	PI	PE	PI	PE	PI
A (mm^2)	70,02	69,92	69,85	70,96	71,55	70,61	71,55	71,09
σ_U (Kgf/mm^2)	8,14	9,07	8,01	8,41	7,93	8,10	7,49	7,96
Elongación (%)	26,20	22,50	27,00	27,10	29,10	28,30	29,10	30,30
CE (%IACS)	62,50	62,70	62,20	61,70	62,40	62,70	62,80	62,10

Tabla 14: Diferencias entre material sin recocido y material después del tratamiento térmico (6, 8, 10 y 12 Horas).

Tiempo recocido	6 Horas		8 Horas		10 Horas		12 Horas	
	PE	PI	PE	PI	3,77	3,84	4,08	4,01
σ_U (Kgf/mm^2)	3,70	2,69	3,73	3,71	14,0	13,1	13,1	15,0
δ (%)	10,4	6,9	11,7	11,3	1,8	2,1	2,4	1,7
CE (%IACS)	2,0	2,1	1,7	1,1	3,77	3,84	4,08	4,01

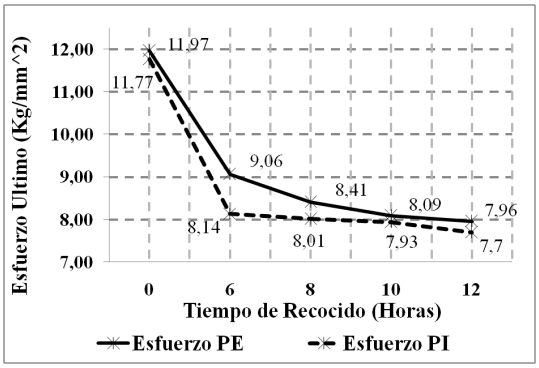


Figura 7: Esfuerzo último vs tiempo de recocido.

acuerdo con la Figura 8.

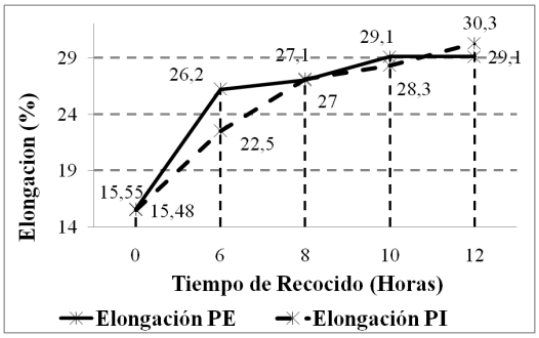


Figura 8: Elongación vs tiempo de recocido.

del endurecimiento por deformación que sufre el material en el proceso de fabricación, haciéndose más dúctil. En función a lo antes expuesto se debe establecer un tiempo específico de recocido del material con las características más favorables de este ante el recocido.

Se destacó que para todas las etapas del recocido cumple por encima de su promedio ponderado con la especificación de calidad más exigente del esfuerzo último para el caso de exportación (6–9 kg/mm^2).

El comportamiento de la elongación es consistente con el aumento de la ductilidad, presentando una tendencia de crecimiento de alrededor a 45° y un promedio de R^2 aproximadamente de 0,80 de

Como Jiménez [18] lo expone, "La deformación es el resultado del movimiento de defectos microscópicos a través del cristal (interacciones entre el campo de deformación y las dislocaciones), al correlacionar las propiedades mecánicas con las características microestructurales", concluye que el incremento del esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y la microdureza evidencian que el material se ha endurecido. En el caso de la aleación AA-8176 también se endurece por deformación plástica en el proceso de fabricación y recupera sus propiedades en el tratamiento de recocido (Figura 9), donde se denota que a mayor tiempo de recocido disminuye el esfuerzo último y aumenta la elongación.

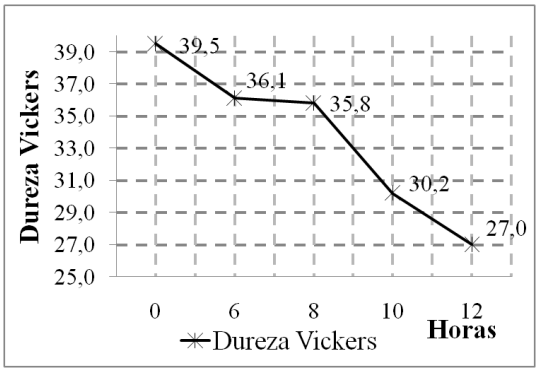


Figura 9: Dureza Vickers vs tiempo de recocido.

Se destaca la importancia del tratamiento térmico de recocido para alcanzar las especificaciones del producto requeridas tanto para consumo interno o de exportación.

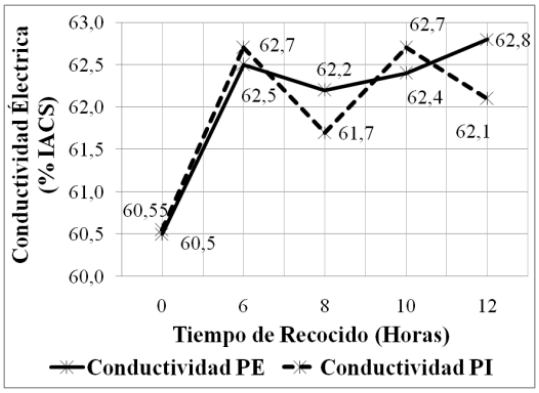


Figura 10: Conductividad eléctrica vs tiempo de recocido.

En la Figura 10 se observa como la conductividad eléctrica del material fue afectada levemente por el aumento del tiempo de recocido, se observó una pequeña oscilación en los valores en las PE y PI, esto podría indicar una relación de la conductividad con el endurecimiento o envejecimiento y tal vez esta pudiera estar más relacionada con la pureza de la aleación, asociada con las inclusiones metálicas o no metálicas (óxidos, inclusiones metálicas o no metálicas e impurezas).

Garzón et al. [19] realizaron un tratamiento de homogenización de dos horas a una temperatura de 570 °C, más un enfriamiento rápido y un tratamiento de envejecimiento de 0-18 horas. Concluye que debido al envejecimiento se producen los procesos de nucleación y crecimiento de los precipitados (difusión de los granos), lo que permite un cambio en la conductividad eléctrica de la aleación AA 8176 y el tiempo de envejecimiento cambia el carácter morfológico de la aleación AA-8176, es decir, cambia la microestructura y mejora su conductividad eléctrica. En este estudio el procedimiento fue un recocido de 6, 8, 10 y 12 Horas a una temperatura entre 500-520 °C, esto pudo haber inducido un efecto de envejecimiento que favoreció la microestructura y la conductividad del material por los resultados que se observan en la Figura 10.

Como lo indican Jablonski et al. [20] en un conductor real, el cual posee defectos producto, de las imperfecciones de la red: la movilidad y velocidad de las cargas eléctricas depende críticamente del número y tipo de defectos estructurales, a mayor número de defectos de la red, menor distancia entre colisiones, menor movilidad y menor conductividad eléctrica. Los electrones se desplazan por el material como ondas electromagnéticas que permiten ajustar su periodicidad a la red cristalina. Esto valida que la conductividad se ve afectada por las imperfecciones del material, por lo que la aleación de aluminio debe ser muy bien refinada para minimizar en lo posible el número de estas imperfecciones para obtener un buen conductor eléctrico.

3.2. Ensayo de Microdureza.

Se realizó el ensayo de dureza a las muestras y se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultado del ensayo microdureza.

Tiempo Recocido (Horas	D1 (mm)	D2 (mm)	Dureza (HV)
0	0,0488	0,0482	39,5
6	0,0516	0,0498	36,1
8	0,0514	0,0504	35,8
10	0,0536	0,0572	30,2
12	0,0585	0,0587	27,0

Se observó que a medida que se incrementa el tiempo de exposición del recocido el material

se hace más dúctil, esto se demostró como una disminución constante del valor de dureza del material (Figura 9). Se apreció un crecimiento de grano desde 30 μm hasta alcanzar un tamaño promedio de 200 μm para el recocido de 12 horas, así como también la disminución de la dureza.

Cuando los granos están libres de deformación desaparece el reforzamiento creado por el trabajo en frío y eso explica la disminución de la resistencia y la dureza.

3.3. Microestructura antes y después del tratamiento térmico

Se realizó el procedimiento a las muestras para ser visualizadas a través de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido.

Ensayo de microscopia óptica. En la microscopia se observa para el estado inicial sin revenido una microestructura característica de la aleación de aluminio AA-8176 con algunas imperfecciones y porosidades que se revelaron en la microscopia electrónica de barrido.

En la Figura 11 se muestran las micrografías del material para un tiempo de revenido de: 0, 6, 8, 10 y 12 horas, en estas imágenes se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de revenido el tamaño del grano hay un crecimiento del tamaño de grano de 30 μm para 6 Horas hasta 200 μm para el recocido de 12 horas. Así como también las fases comienzan a desaparecer, presentándose un proceso de nucleación y crecimiento. También que se revelan mejor las imperfecciones, que presentan formas redondeadas.

3.4. Ensayo de Microscopia Electrónica de Barrido

Las fotomicrografías para un tiempo de revenido de: 0, 6, 8, 10 y 12 horas mostradas en la Figura 12, donde se observaron inclusiones como formas o puntos oscuros que resaltan de manera brillante con una forma poco uniforme, asimismo las porosidades se detallan como líneas alargadas o puntos claros opacos más pequeños que las inclusiones. Se demostró la presencia de un alto índice de imperfecciones como inclusiones metálicas y no metálicas, presencia de óxido de aluminio y carbonatos, así como también muchas porosidades en una matriz rica de aluminio.

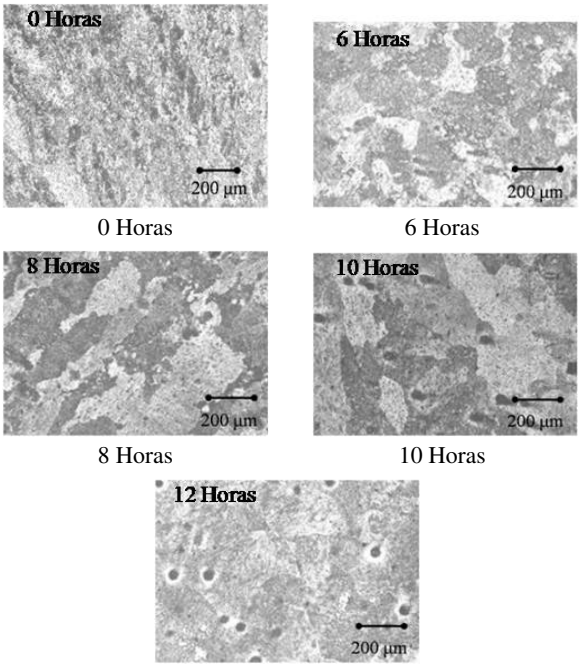


Figura 11: Fotomicrografía del material con revenido de 0, 6, 8, 10 y 12 horas.

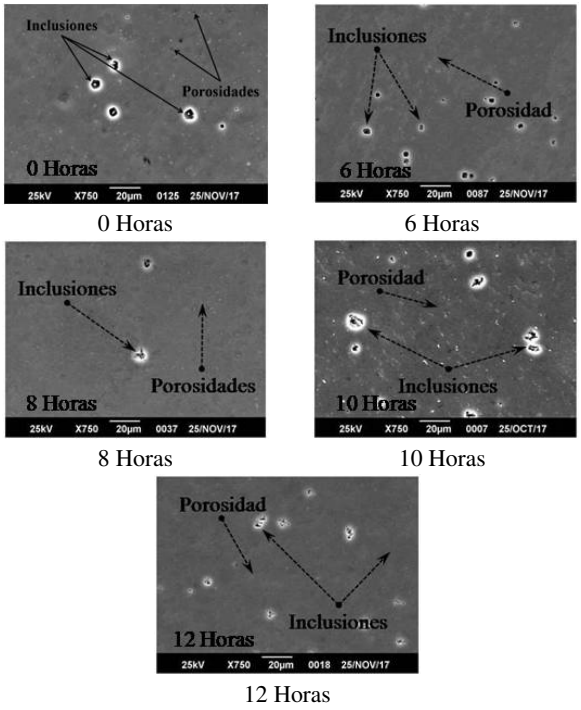


Figura 12: Fotomicrografía con MEB para 0, 6, 8, 10 y 12 Horas.

En el estudio del Detector de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) junto con el mapeo de las muestras analizadas se observaron los precipitados compuestos por elementos como hierro, cobre, silicio y las fases A_{l6}(Fe, Cu) y el resto matriz de aluminio. Con una composición química constituida por oxido de aluminio Al_2O_3 (alúmina), dióxido de silicio SiO_2, hierro en diferentes fases Fe, carbonatos de calcio $CaCO_3$ y la presencia de gases como oxigeno (O_2) que constituyeron en la porosidad presente de la aleación AA-8176 (Figura 13). Se considera que las inclusiones de Fe y Si presentes son las que predominan y tienen un tamaño promedio aproximado de 15μm.

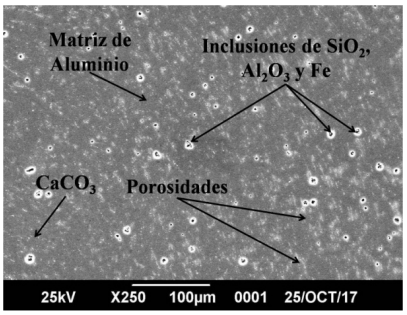


Figura 13: Algunas imperfecciones del Material.

En las Figuras 14, 15, 16, 17 y 18 se presentan las micrografías del ensayo de MEB con un aumento de 2000X, en donde se muestran algunas de las muchas imperfecciones e inclusiones metálicas o no metálicas presentes en el material, las cuales se revelaron en todas las etapas de recocido. La aleación base presenta gran cantidad de porosidades e inclusiones metálicas y no metálicas, que se deben depurar porque no contribuyen con la calidad del producto y afectan las propiedades del material.

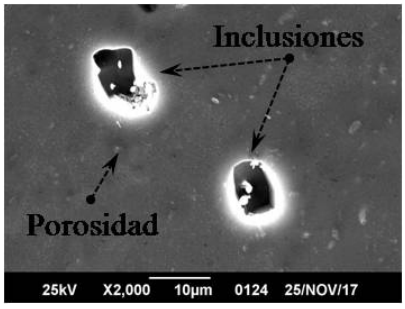


Figura 14: Material en condición original.

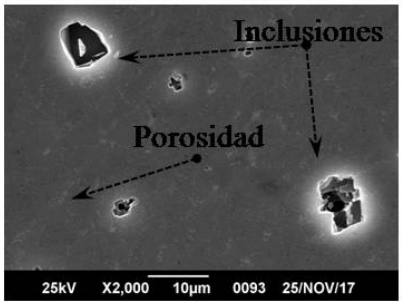


Figura 15: Con recocido de 6 horas.

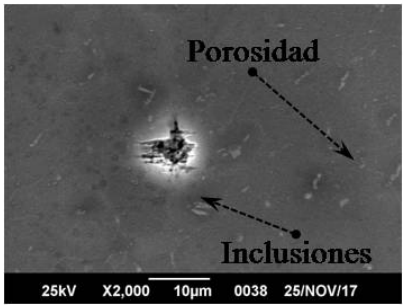


Figura 16: Con recocido de 8 horas.

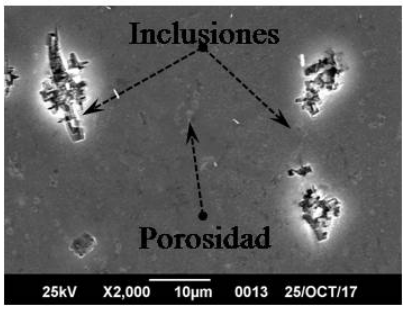


Figura 17: Con recocido de 10 horas.

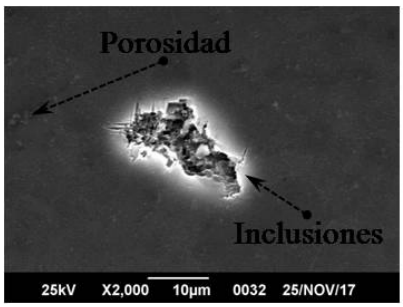
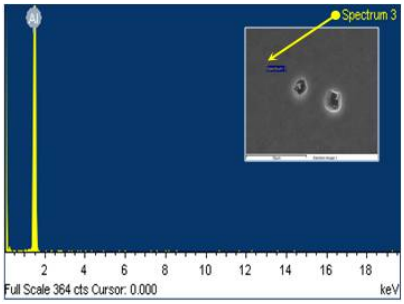


Figura 18: Con recocido de 12 horas.

El EDS (Energy Dispersive Spectrometer) reveló la microestructura típica del aluminio, se observaron inclusiones y precipitaciones y se determinó la composición química de estos puntos observados en la muestra, así como también

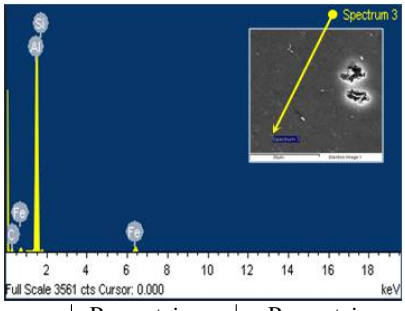
cualquier otro elemento de la matriz de aluminio. Para ello, en las Figuras 19, 20, 21 y 22 se presentan los puntos seleccionados para el análisis de las muestras de la aleación AA-8176.

Para la Figura 19, en el punto seleccionado se obtuvo como resultado una composición de 100 por ciento de aluminio. Por lo que se considera que solo hay aluminio en este punto.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
Al K	100,00	100,00
Total	100,00	100,00

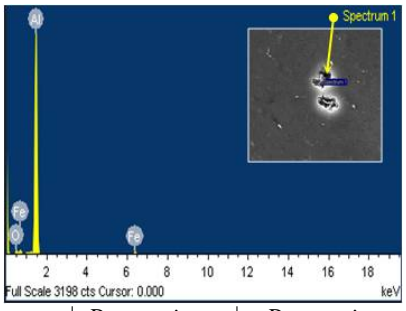
Figura 19: Ensayo de EDS 1.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
C K	28,83	48,85
Al K	62,76	47,34
Si K	2,05	1,49
Fe K	6,36	2,32
Total	100,00	100,00

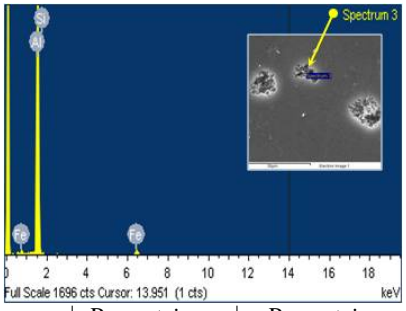
Figura 20: Ensayo de EDS 2.

En la micrografía mostrada en las Figuras 20, 21 y 22 se encontraron concentraciones de carbono y algo de silicio, oxígeno, hierro y por supuesto la matriz de aluminio en los puntos estudiados, lo cual indica que la aleación presenta componentes que producen porosidades, y precipitados de Fe, Si y otros elementos que disminuyen las propiedades y la conductividad de los conductores eléctricos fabricados con la aleación de aluminio AA 8176.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
O K	11,98	19,04
Al K	83,83	79,05
Fe K	4,19	1,91
Total	100,00	100,00

Figura 21: Ensayo de EDS 3.



Elemento	Porcentaje en peso	Porcentaje en peso atómico
Al K	92,66	95,34
Si K	2,06	2,03
Fe K	5,28	2,63
Total	100,00	100,00

Figura 22: Ensayo de EDS 4.

Como lo indica Garzón et al [19], cualquier aumento en la conductividad tiene un impacto directo en la reducción de la pérdida de energía en líneas eléctricas, con sus respectivas consecuencias económicas, técnicas y ambientales. Esto determina que al mejorar la calidad del material y mantener el control del proceso de producción para obtener un conductor eléctrico con un nivel mínimo de imperfecciones o inclusiones que le permitirán una mejor eficiencia eléctrica en beneficio del ambiente.

4. Conclusiones

Se reconoce como una política acertada la sustitución de importaciones, cuando la importación

es complicada o los costos implícitos son altos, asi como también en general.

Se debe mejorar al inicio el refinado de la aleación AA-8176 para disminuir las imperfecciones e inclusiones metálicas o no metálicas, el porcentaje de gases, dióxido de silicio, carbonatos de calcio e impurezas para obtener un mejor producto final.

A medida que se incrementa el tiempo de exposición del tratamiento térmico de revenido el material se hace más dúctil y su tamaño de grano aumenta.

Los resultados de las propiedades mecánicas y eléctricas de la aleación AA-8176 obtenidos con el tratamiento térmico de recocido en todas sus etapas de 6, 8, 10 y 12 horas se ajustan a las normas ASTM B800-05 y a las especificaciones técnicas de la empresa.

Se estableció el revenido de 8 horas como el más favorable en función de la especificación del producto y de la optimización del tiempo, en relación al esfuerzo de ruptura, conductividad, elongación y al crecimiento del grano, que inciden directamente en las propiedades del material.

5. Referencias

[1] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Metales y aleaciones no ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones*, 5ta ed. México: Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 2008.

[2] J. Espinoza, *Manual práctico de carpintería metálica*. Editorial Visión Libros, 2013.

[3] M. Jiménez, "Análisis técnico económicos de la fabricación y utilización de conductores eléctricos de aluminio aislados hasta 2000 voltios," Trabajo especial de grado, Escuela Politécnica Nacional de Ingeniería, Ecuador, 2003.

[4] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Pearson Editores. Prentice Hall Hispanoamérica S.A., 1997.

[5] W. Callister, *Propiedades eléctricas*, 1era ed., serie Ciencia e ingeniería de los materiales. España: Reverté, S.A., 2007.

[6] CODELECTRA, *COVENIN 452-89, Determinación de la resistividad de materiales metálicos conductores eléctricos*, COVENIN, COVENIN Standard COVENIN 452-89, 1989.

[7] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

[8] ASTM, *ASTM B 557. Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum-and Magnesium-Alloy Products*, ASTM International, 2015.

[9] ASTM, *ASTM B 193-02. Método estándar para la prueba de resistividad de materiales conductores eléctricos*, ASTM International, 2002.

[10] E. Avallone y T. Baumeister, *Manual del Ingeniero Mecánico*, 9th ed. México: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A., 2004, vol. tomo 1.

[11] F. Morral y E. Jimeno, *Metales ligeros*, 1era ed. España: Reverté, S.A., 2004.

[12] R. Norton y E. Jimeno, *Propiedades de materiales*. México: Pearson Education, S.A., 2011, ch. Apéndice E, pp. 986–987.

[13] *ASTM E3-01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*, ASTM International, 2002.

[14] ASTM, *ASTM E 407-07. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, ASTM International.

[15] ASTM, *ASTM B 800-05. Método estándar para la prueba de resistividad de materiales conductores eléctricos*, ASTM International, 2002.

[16] N. Caicedo y R. Pons, "Optimización del Proceso de fabricación de Alambres de Aleación 6201 T-81," *INGE CUC*, vol. 7, no. 1, pp. 207–216, 2011.

[17] I. Orsi, "Evolución de defectos en el trefilado de alambrón de aluminio," ALUAR, Argentina, Reporte técnico, 2019.

[18] H. Jiménez, "Comportamiento mecánico y microestructural de la aleación AlMgSi para conductores eléctricos," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 2, pp. 199–212, 2019.

[19] D. Garzón, E. García, y H. Sánchez, "Influencia del tiempo de envejecimiento en la conductividad eléctrica de aleaciones de aluminio serie 8000 AA-8176," *Revista Información Tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 101–110, 2019.

[20] M. Jablonski, T. Knych, and B. Smyrak, "Effect of iron addition to aluminium on the structure and properties of wires used for electrical purposes," *Material Science Forum*, no. 54, pp. 459–462, 2011.

Volumen 27 Número 2

Editorial

Presentamos el Volumen 27, N° 2 Agosto 2020 de Revista Ingeniería UC, destacando en principio nuestra incorporación a la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (RedIB), plataforma que nos permite seguir expandiendo el espectro de visibilidad, difusión y alcance de las investigaciones y la producción intelectual de nuestros autores. Así mismo, informamos que nos encontramos también indizados en el "Directory of Open Access Journals" (DOAJ), reafirmándose una vez más la calidad académica, científica y editorial de este medio, todo lo cual da cuenta de la mística de trabajo de un equipo que se crece ante las dificultades y sigue adelante en la búsqueda de más y mejores formas de hacer las cosas para dar alcance a los objetivos y metas que han sido trazados.

Abrimos el número con el estado del arte presentado por los doctores Alied Romero y Juan Pereira, quienes analizan una macromolécula lineal de polisacarido, conocido como Quitosano, desde su obtención hasta las múltiples aplicaciones en diversos campos.

Sánchez y colaboradores, muestran los resultados de un estudio de amplio interés desde el punto de vista del uso óptimo de los recursos hídricos y la productividad de cultivos, como lo es el efecto de la disposición de laterales de riego por goteo y secado parcial del suelo en el rendimiento de papa. El rendimiento obtenido en la mencionada investigación cuadruplica al rendimiento nacional del Perú de unas 15 t/ha de papa y permite un ahorro de agua de más del 30 %.

Por otro lado, Centeno y su equipo, presentan el estudio sobre la degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar, demostrando que el lodo rojo resultó apropiado para disminuir la concentración de la DQO y fenol mediante POA solar.

Medina-Valderrama y sus colaboradores nos presentan en su trabajo, los hallazgos del tratamiento de aguas residuales de camales por medio de tecnologías avanzadas de oxidación, específicamente proceso fenton, registrando una mejora del indicador de biodegradabilidad a un valor de 0,5 y una remoción de la DQO alrededor del 79,9 %. Así, de acuerdo a los resultados obtenidos, el proceso Fenton resulta ser una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales de camales y puede ser aplicado como pre-tratamiento.

Rahmani y su equipo, presentan una propuesta para el manejo y uso de recursos hídricos a través del uso de un modelo basado en agentes para gestionar la situación crítica de los recursos de aguas subterráneas y el equilibrio de los acuíferos, en el caso específico del Acuífero de la llanura Irán-Qazvin. Paralelamente, Lujano y su grupo de investigadores, plantean la Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú.

Por otra parte, Ortiz muestra una evaluación exhaustiva de los aguas residuales de los autolavados de Cumaná, determinando mediante la caracterización fisicoquímica que estas aguas presentan alta carga de contaminantes, sobrepasando el límite máximo establecido en la normativa ambiental vigente, Gaceta Oficial de la República de Venezuela, N° 5021 (1995), Decreto N° 883, Capítulo III, sección V: descarga en las redes cloacales.

Contreras y colaboradores, en su estudio acerca de la influencia del número de pasadas sobre los esfuerzos residuales al soldar un acero ASTM A131 mediante el proceso GMAW, indican que el número de pasadas repercute sobre el valor de los esfuerzos residuales ya que el calor aportado favorece la formación de microestructura con características como la ferrita de Widmanstätten y la perlita.

Para finalizar, presentamos dos notas técnicas, la primera de ellas corresponde al estudio de los

parámetros de las lámparas de filamento LED, su comparación con sistemas de iluminación general de marcas comerciales y sus posibles aplicaciones desarrollado por Zheleznikova y colaboradores; concluyendo con el estudio desarrollado por Cantor-Rudas en el cual se establece la analogía entre un sistema biológico y uno físico, específicamente asociando la carga y descarga de un condensador con las etapas involucradas con el volumen ventricular del sistema cardiovascular humano.

Cerramos este editorial, invitando a publicar en nuestra Revista INGENIERÍA UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería y ciencias afines.

Profesor *Manuel Jiménez-Bahri*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesor *Ángel Almarza-Morales*, Dr.
Editor – Jefe

Review: Chitosan, a versatil biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications

Alied Romero–Serrano , Juan Pereira *

Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo (UC). Valencia, Venezuela.

Abstract.- For decades, science studies a linear potential polysaccharide macromolecule known as Chitosan composed of β-(1→4) D-glucosamine and N-acetyl- D-glucosamine. It´s well known the origin from Chitin, which turns out to be the second most abundant biopolymer in nature after cellulose. Chitosan is of great interest for science due its high solubility in water and ease to derivatization because numerous amines and hidroxil functional groups are present in the polymeric structure, which allows several modifications on its structure that give way to dabble in multiple applications, even little explored. Many fields of science such as biomedical, pharma&cosmetic, agricultural, industry and foods, remain active in generating knowledges based on its derivatives and its multiple applications.

Keywords: chitosan; chitin; polysaccharide; derivatives; applications.

Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones

Resumen.- Desde hace décadas, la ciencia estudia una potencial macromolécula lineal de polisacárido conocido como Quitosano, compuesto por unidades moleculares de β-(1→ 4) D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina. Es bien conocido el detalle de su obtención a partir de la Quitina, compuesto que resulta ser el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza luego de la celulosa. El Quitosano es de gran interés para la ciencia, debido a su alta solubilidad en agua y facilidad para derivatizarse, dada la presencia de numerosos grupos funcionales aminos e hidroxilos en su estructura polimérica, lo cual permite diversas modificaciones sobre su estructura que dan paso a incursionar en múltiples aplicaciones, incluso poco exploradas. Diversos campos de investigación como la biomedicina, farmacosmética, agricultura, industria y alimentos se mantienen activos en la generación de conocimientos basados en sus derivados y las múltiples aplicaciones que ofrecen.

Palabras clave: quitosano; quitina; polisacárido; derivados; aplicaciones.

Recibido: 26 de mayo, 2020.
Aceptado: 23 de julio, 2020.

1. Introducción

Uno de los más grandes intereses de la ciencia actual, se centra en la búsqueda de biomateriales que permitan liberar los mercados del uso de moléculas derivadas de fuentes petroquímicas, promotoras de compuestos orgánicos volátiles (C.O.V) u otros químicos con alta toxicidad residual. Sustancias como la epiclorhidrina, toluen-di-isocianato (TDI), formaldehído, etc., afectan en gran magnitud tanto a la salud como al medioambiente. Al contrario, la molécula de Quitina representa una fuente natural, libre de toxicidad, con alta actividad química y biológica.

La Quitina, es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza y su aparición inició con el químico francés Henri Braconott en 1811 quien extrajo una sustancia del hongo *Agaricus volvaceus*, insoluble en medio alcalino, a la que llamó "*Fungina*". Odler en 1823, descubrió una sustancia similar en la cutícula de un insecto (escarabajo) a la cual nombró por primera vez como Quitina del griego " χιτών"que significa "Chiton" o "envoltura". Stadler más tarde, en 1859 la describió como un carbohidrato y Ledderhose 1876 como una glucosamina [1]. Gracias a los trabajos

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*juancpereira73@gmail.com (J. Pereira)

de Fräenkel & Kelly en 1901 [2], se identificó que la Quitina estaba constituida por unidades monoméricas de glucosamina acetilada enlazadas. Seguidamente, estos autores propusieron por primera vez que la Quitina se trataba de un polisacárido lineal.

Una segunda era en la investigación, se centró en su estructura con Berlese en 1909 [1], y la tercera era, con Morgulis *et al* (1916) [3], quienes debatieron sobre la complejidad de la molécula y su contenido de nitrógeno; para luego proponer una estructura química que finalmente fue confirmada y aceptada con el trabajo realizado por Meyer & Pankow 1935 [4]. Estos últimos autores, emplearon la técnica de difracción RX, para elucidar la molécula que luego denominaron α-Quitina. En 1950, Lotmar y Picken, compararon este estudio con el isómero β-Quitina empleando la misma técnica [5].

La Quitina es físicamente un compuesto blanco, duro e inelástico, y es un componente estructural de los exoesqueletos de artrópodos como cangrejos, camarones, langostas y moluscos (calamares, ostras, sepias, cefalópodos). También es extraído de las paredes celulares de los hongos, así como se encuentra en la matriz extracelular de una variedad de invertebrados incluidos insectos, poríferas (esponjas) [6], platelmintos y nemátodos, acompañada principalmente de carbonato de calcio y proteínas en la mayoría de estos organismos [1].

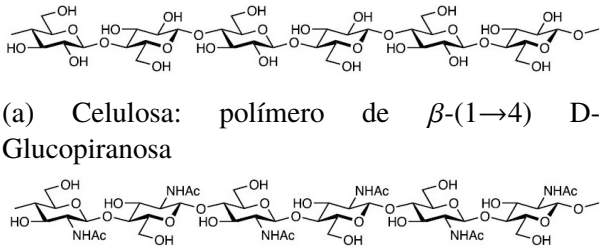
Siendo la Celulosa el polímero más abundante en la naturaleza, resulta químicamente interesante la similitud estructural con la Quitina, cuya diferencia radica básicamente en los grupos acetamidos presentes en el carbono C2 y que reemplazan grupos -OH en la molécula de Celulosa [7, 8], como puede observarse en la Figura 1.

Dado que las fibras de la Quitina se asocian unas a otras, la molécula adopta tres posibles organizaciones cristalinas que se muestran en la Figura 2.

a) *Ordenamiento antiparalelo* (α): presente en la mayor cantidad de artrópodos, siendo la más abundante, estable, altamente cristalina (80 %) y presenta los más fuertes enlaces intermoleculares. Se encuentra en superficies duras o rígidas [4, 7, 9, 10].

b) *Ordenamiento paralelo* (β): encontrado mayoritariamente en calamares, gusanos gigantes e insectos. Resulta más reactiva, semicristalina, más soluble y con débiles fuerzas intermoleculares; además puede hincharse y convertirse en la forma α por ser metaestable y es capaz de biosintetizarse en condiciones específicas [5, 7, 11, 12].

c) *Ordenamiento asimétrico* (γ): es el menos común, y además se ha asociado como una distorsión de las organizaciones α y β [13]; aunque también se ha reportado su presencia en capullos de insectos (escarabajos) y en paredes celulares de hongos [1, 7, 14].



(a) Celulosa: polímero de β-(1→4) D-Glucopiranosa

(b) Quitina: polímero de β-(1→4) 2 acetamido–2 deoxi–D Glucopiranosa

Figura 1: Estructuras Químicas [7]

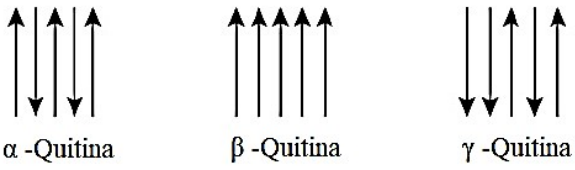


Figura 2: Estructuras Cristalinas de la Quitina [1]

Las dos estructuras alomórficas β y γ, se consideran flexibles y más hidratadas que la α-Quitina.

El Quitosano es obtenido a partir de una reacción en medio básico de la Quitina, conocida como N-Deacetilación. La molécula resultante es producto de la conversión de más del 60 % de los grupos amidos presentes en la Quitina, por lo que se incrementan los grupos aminos ($-NH_2$). Su estructura, ilustrada en

la Figura 3, cuyo nombre químico es poli [β–(1–4)–2–amino–2–desoxi–D–glucopiranosa], puede contener entre 6-9 % de nitrógeno y variados pesos moleculares promedios, purezas y propiedades fisicoquímicas como color, solubilidad, viscosidad, reactividad y cristalinidad. Por tal motivo, es de gran importancia el proceso experimental para deacetilar la Quitina, ya que ello define las aplicaciones finales y el mecanismo de acción de su derivado [15].

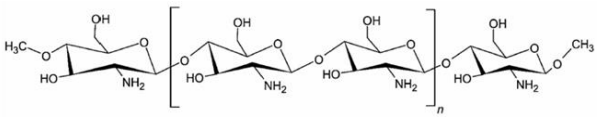


Figura 3: Estructura química de la molécula de Quitosano [16]

El Quitosano resulta un polisacárido catiónico lineal de la familia aminoglucopirano, y de igual forma que la Quitina, es biorenovable, biocompatible, biodegradable, no tóxico, no irritante y además mantiene las mismas estructuras cristalinas α, β, γ [1]. Estas dos moléculas no son únicas, ya que pueden variar en sus valores de masa molecular y grados de deacetilación promedio o grupos aminos libres, lo cual determina su calidad y el uso de estos polímeros.

El Quitosano es un copolímero insoluble a pH neutro y básico debido a sus enlaces intra e intermoleculares formados por puentes de hidrógeno. Su forma cristalina y grupos amino protonables ($-NH_3^+$), permiten que sea soluble en soluciones acuosas ácidas, ya que se incrementa la polaridad y las repulsiones electrostáticas, lo que facilita la formación de asociaciones interpoliméricas [17].

La composición del Quitosano está distribuida de forma aleatoria entre unidades moleculares de β-(1→4) D-glucosamina y N-acetil- D-glucosamina [1]. Este compuesto demuestra mayor versatilidad que la celulosa para reacciones químicas, debido a las posibles sustituciones en los sitios activos aminos ubicados en la posición C2, y a varios grupos hidroxilos también disponibles.

Se han hecho muchos esfuerzos científicos por mejorar su solubilidad en solventes orgánicos convencionales [8, 18], además de explorar sus propiedades funcionales y potenciarlas a través de la preparación de derivados, aplicando reacciones químicas de sustitución, elongación de cadenas o despolimerizaciones (químicas, físicas o enzimáticas) [19].

Los derivados del Quitosano están siendo reportados constantemente en la literatura científica, enriqueciendo y multiplicando las aplicaciones potenciales. Diversas industrias buscan innovar a través del uso de materiales ecológicos y potentes activos químicos como este biopolímero que es posible funcionalizarlo desde muy bajas concentraciones.

Algunas aplicaciones para estos derivados, incluyen: la preservación de alimentos, biotecnología, suplementos dietéticos, antihongos y antibacteriales; fabricación de cosméticos, antioxidantes, fabricación de películas para empaques, nanofibras para la industria textil.

La biomedicina ha desarrollado la dosificación controlada de medicamentos, antitumorales, suturante de heridas, etc [20, 21, 22].

En la agricultura son útiles como recubrimiento de semillas, alimentos para animales, agentes floculantes, entre otras [23, 24, 25].

La industria papelera los emplea como bioadhesivos, aditivos en la fabricación del papel, etc [26, 27, 28].

Otras especialidades han desarrollado su uso como nanoparticulas poliméricas, nanocompuestos, microesferas, hidrogeles, biosensores y muchas más [29, 30, 31, 32, 33, 34].

Este trabajo representa una revisión actualizada del estado del arte de relevantes trabajos de investigación sobre la molécula del Quitosano, considerando los métodos de extracción, así como su caracterización molecular empleando diversas técnicas. Adicionalmente se menciona la preparación de los derivados más comunes, y un resumen de sus aplicaciones científicas e industriales dentro del amplio espectro de conocimientos que continuamente son generados y compartidos en la literatura.

2. Proceso de obtención del Quitosano

2.1. Extracción de Quitina

La producción global de Quitina como el primer biopolímero más abundante en el ecosistema marino, se ha estimado recientemente en 200 billones de toneladas métricas anuales [35].

La fuente de Quitina más conocida, deriva del procesamiento de desechos de cutículas de los exoesqueletos de artrópodos invertebrados, como son los caparazones, tendones y capullos de los crustáceos (camarones y cangrejos principalmente, además de langostas). En ellos se encuentra una red compleja de Quitina (15-40) % (principalmente α-Quitina), unida a proteínas (20-40) %, y sobre la cual se esparce carbonato de calcio (20-60) % para rigidizar las estructuras.

Adicionalmente están presentes los lípidos remanentes de músculos, así como pigmentos tipo carotenoides, y otras sales metálicas como componentes minoritarios.

En cuanto a β y γ-Quitina, la composición de carbonatos se reduce a <5 % y <0,2 % respectivamente [7], mientras que la cantidad de proteínas resulta más elevada con respecto a la molécula α-Quitina. La Tabla 1 muestra un resumen comparativo, en la cual se describen detalladamente los contenidos de minerales y proteínas de acuerdo a la biomasa.

Otras fuentes de extracción de Quitina que también han sido exploradas desde hace muchos años, incluyen: insectos [14, 36], moluscos (calamares) [37, 38], algas coralinas y verdes [39], capullos de anélidos (gusanos), levaduras y varios tipos de micelias (hongos) [40, 41], y más recientemente, se encuentran las esponjas marinas [6], resultando opciones con procesos de extracción más ecológicos, pero con la desventaja principal de ofrecer bajos rendimientos.

Dado el gran interés actual por emplear este material en diversos campos de la ciencia, la literatura de la última década reporta como se han estado explorando más fuentes de Quitina, no estacionales (como es el caso de los crustáceos), a través de corales negros, lofóforos [36], nuevas especies de arácnidos [42] y grillos [43].

Más recientemente, han sido reportados trabajos sobre prácticas modernas para el tratamiento de los desechos de mariscos y moluscos: cabezas, colas, conchas, esqueletos, piel, escamas, etc. Estos productos generarían enormes cantidades de Quitina, gelatinas, ácidos grasos, proteínas, minerales, colágenos y seguramente otras moléculas no explotadas. La desventaja radica en que aún no se cuenta con metodologías que estandaricen las extracciones de estos desechos a nivel industrial [16]. La disposición actual de estos desechos es la incineración, rellenos sanitarios, devolver al mar o esperar su descomposición natural. Procedimientos inadecuados, generan implicaciones negativas al medioambiente, ecosistemas y salud del ser humano, de allí que exista el interés de continuar investigando al respecto [16, 44, 45]. De hecho, ya existe interés por explotar estos desechos como futuros biocombustibles [35].

Tabla 1: Fuentes de Quitina α, β, γ [7, 41]

Biomasa	% Quitina	Tipo de Quitina	% $CaCO_3$	% Proteínas
Cutícula de cangrejo	15-30	α	40-50	20-40
Cutícula de camarón	30-40	α	20-30	20-40
Concha de langosta	16-23	α	20-60	20-40
Concha de almeja / ostra	03-06	α	85-90	
Cutícula de insecto (rastreros, mariposas, larvas)	18-64	α	20-50	20-50
Pluma de calamar	31-49	β	<5	50-60
Gusano tubular de océano	25-29	β	<5	>30
Pared celular de levaduras, micelias, mohos)	8-43	γ	<0,2	50-60 *

*:(como complejo con β-Glucan)

La etapa de extracción de la Quitina representa la más crucial, debido a que los parámetros y condiciones del método aplicado regulan las características principales de la Quitina pura, tales como: su peso molecular, grado de N-acetilación, pureza, índice de polidispersidad, viscosidad, color, etc., las cuales influencian directamente en los campos de aplicación final. Varios procesos

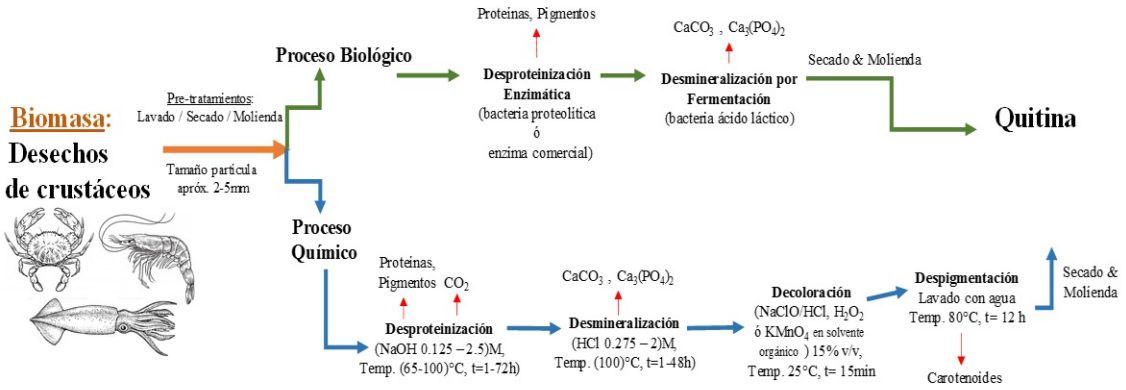


Figura 4: Procesos de extracción de Quitina [23]

son descritos en la literatura para extraer Quitina, y todos se basan en la desproteinización y desmineralización de la biomasa que la contiene.

Dos ramas de la ciencia están involucradas: La Biotecnología y los Procesos Químicos. Ambos descritos detalladamente en la Figura 4.

2.1.1. Proceso biológico (Biotecnología)

Referido a una opción ecológica "verde" que está ganando atención por la aplicación de enzimas y microorganismos para recuperar Quitina a partir de desechos de artrópodos. Este proceso ofrece una manipulación simple y de muy alta reproducibilidad, pero se encuentra aún poco explorada por lo que su aplicación industrial aún no brinda sus primeros frutos.

Las dos etapas más comunes, que describen este proceso Biotecnológico son:

a) Desproteinización enzimática: se emplean enzimas proteolíticas crudas o purificadas, como la proteasa, derivada de plantas, animales y bacterias, (estas últimas las más comunes). Este método resulta de menor eficiencia que el proceso químico, es costoso y un 5-10 % de las proteínas queda remanente en la Quitina extraída, por lo que requiere en ocasiones combinar con un tratamiento químico con NaOH para incrementar la pureza.

   La fracción líquida obtenida contiene proteínas, minerales y carotenos, que luego puede emplearse en la preparación de suplementos alimenticios y en fórmulas de comidas para animales [16, 46].

b) Desmineralización por Fermentación: es la etapa complementaria; resulta más sencilla y de menor costo, y emplea cepas microbiológicas seleccionadas por fermentación (con y sin ácido láctico), para que ocurra la desmineralización del carbonato de calcio presente en la biomasa [47, 48].

2.1.2. Proceso químico

Es conocido como el proceso más tradicional e industrializado para extraer la Quitina, principalmente de la biomasa derivada de crustáceos. Consiste en tres etapas:

a) Desproteinización: Es la etapa más crítica del proceso, donde se emplea NaOH en un rango de concentración (0,125 - 2,5)M, temperaturas variables hasta alcanzar los 100 °C y el tiempo de tratamiento varía de pocos minutos hasta alcanzar 2 a 3 días, dependiendo de la fuente específica de la biomasa.

   El objetivo de esta etapa es romper los enlaces químicos existentes entre las proteínas y la Quitina, pero de acuerdo a las condiciones específicas del proceso, podrían permanecer proteínas remanentes, lo cual afectaría su calidad y limitaría sus aplicaciones (principalmente biomédicas). Adicionalmente puede ocurrir una deacetilación parcial de la Quitina, así como una hidrólisis que reduciría finalmente su peso molecular [7, 49].

Algunos autores han recomendado realizar este procedimiento más de una vez, pero empleando concentraciones bajas de NaOH, con la finalidad de proteger la estructura nativa de la Quitina, además del rendimiento y el grado de N-acetilación [50]. Por otro lado, se han realizado estudios con otros reactivos básicos como Na_2CO_3, $NaHCO_3$, KOH, K_2CO_3, $Ca(OH)_2$, Na_3PO_4, Na_2SO_3, $Ca(HSO_3)_2$, Na_2S, etc., pero el más efectivo ha resultado ser el NaOH [49].

b) Desmineralización: consiste en la remoción de minerales, principalmente carbonato de calcio, a través de un tratamiento ácido. Es posible emplear ácidos orgánicos e inorgánicos como: HCl, HNO_3, H_2SO_4, CH_3COOH, entre otros. El HCl es el más común, y es diluido a concentraciones variables entre 0,275 M a 2 M. La reacción se completa en máximo 48 horas, dependiendo de la biomasa, y requiere de una temperatura no mayor a 100 °C [51].

El proceso ocurre de forma rápida y se genera la transformación del carbonato de calcio en sales solubles y gas CO_2 como se demuestra en la ecuación (1), el cual genera una espuma que a nivel industrial requiere ser tratada con antiespumantes siliconados [51].

$$2\,HCl + CaCO_3 \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2 \uparrow \quad (1)$$

Debido a esta generación de espuma, es que se realiza comúnmente el proceso de desproteinización seguido de la desmineralización. Otros autores también han recomendado realizar los procesos en orden invertido, incluyendo el antiespumante, con el fin de garantizar el colapso de la espuma desde el inicio, ya que consideran que de esta forma, las siliconas añadidas resultan ser más efectivas. Bajo este procedimiento, se generaría una Quitina de mayor calidad y más alto rendimiento [52].

c) Decoloración y Post-tratamiento: En esta última etapa, la Quitina extraída es blanqueada a través de un tratamiento donde se emplea una solución al 15 % v/v de NaClO/HCl en una relación sólido/solvente de 1:10 (p/v) a temperatura ambiente por 15 min. Posteriormente se lava con agua destilada y se seca a 80 °C por 12 horas para extraer los pigmentos carotenoides [53]. También puede realizarse un tratamiento oxidativo suave empleando H_2O_2 o $KMnO_4$, o realizar extracciones con solventes como: acetona, etanol y/o cloroformo. Al finalizar esta etapa, pudiera ser necesario aplicar un post-tratamiento como: neutralización, secado y/o molienda [39].

Estudios comparativos entre los procesos biológicos y químicos han sido reportados por algunos autores, concluyendo que un método mixto incrementa la calidad y el rendimiento. Adicionalmente, se eleva el grado de acetilación de la Quitina, se reduce al mínimo el contenido de proteínas y resulta una alternativa de menor costo y eco-amigable con respecto al proceso químico practicado actualmente con fines comerciales [54, 55].

2.1.3. Procesos "Green": las nuevas tendencias

Recientes investigaciones apuntan a técnicas más especializadas, que involucran el uso de equipos de alta tecnología que permitirían reducir los tiempos de extracción, aumentar la eficiencia, seguridad del proceso, rendimientos de la reacción, y además, ser más ecológicas, dada la reducción de uso de solventes ácidos y alcalinos.

Algunas de estas técnicas se encuentran detalladas en la literatura actual y se basan en extracciones asistidas: vía irradiación microondas, aplicación de campo eléctrico pulsado, ultrasonido, alta presión, fluidos supercríticos, filtración por membranas, etc., con las cuales se experimenta la recuperación de los desechos procedentes de la industrialización de la comida de productos del mar [45, 56].

2.2. Derivatización de Quitina a Quitosano.

A partir de la Quitina extraída, se obtiene su principal derivado (Quitosano), el cual es un polisacárido compuesto por unidades deacetiladas y acetiladas de N-glucosamina unidas por enlaces β-1,4 a grupos glicosídicos.

La derivatización se realiza como una conversión parcial de grupos acetamidos que producen iones acetato y grupos aminos con un pKa~6.3, lo que implica que a bajos valores de pH, pueden protonarse y ganar una densidad de carga positiva.

El Quitosano resultante posee una mayor reactividad, menor cristalinidad y solubilidad en medio ácido a pH<6, entre otras propiedades. El grado de deacetilación (DA) es una relación entre las unidades de glucosamina y N-acetil glucosamina presentes, e influencia directamente sobre las propiedades tanto físicoquímicas (fuerza a la rotura, solubilidad, área superficial, viscosidad, porosidad, conductividad y flexibilidad), como biológicas: (biodegradabilidad, biocompatibilidad, adsorción, antioxidante, etc.), las cuales se ven influenciadas por las condiciones en las que ocurre el proceso de transformación [16].

La Quitina es modificada bajo el proceso de N-deacetilación, que ocurre cuando la molécula es sometida a una reacción de hidrólisis en medio fuertemente alcalino empleando soluciones acuosas de NaOH o KOH entre 30-50 % p/v. La Figura 5 describe las condiciones específicas del proceso industrial más común para modificar la molécula de la Quitina, con el cual se obtendría el rendimiento más alto posible del Quitosano.

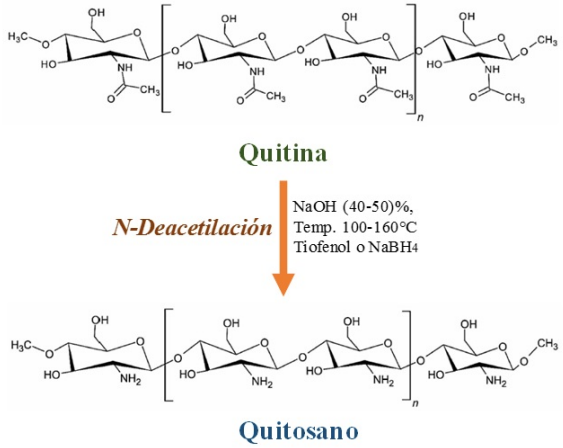


Figura 5: Proceso de transformación de la Quitina a Quitosano [16]

El proceso químico se lleva a cabo como una reacción de sustitución nucleofílica de dos pasos: El primer paso de este mecanismo, consiste en la adición nucleofílica de un grupo hidroxilo sobre un grupo carbonilo de la función amido, desarrollándose cargas iónicas, las cuales se ven favorecidas por el alto valor de la constante dieléctrica del solvente. De allí que se prefiera el NaOH (80,1 en agua) vs KOH (25,3 en EtOH, y 41,4 en etilenglicol) [50].

En el segundo paso, se forma una amina cuando se desprende el ácido acético formado y se estabiliza la molécula.

La Figura 6 muestra el mecanismo químico a través del cual ocurren las rupturas y formación de enlaces químicos covalentes que generan el cambio de funcionalidad de la molécula de Quitina.

El proceso de N-Deacetilación de la Quitina tiene su origen en dos procedimientos tradicionales que han sido considerados como guías dentro de la literatura y se basan en los experimentos diseñados por Broussignac y Kurita, que además han sido comparados en estudios de procesos de deacetilación específica sobre α y β- Quitina [50].

A nivel industrial, se conocen dos metodologías que pueden ser aplicadas sobre la Quitina sólida con un grado de acetilación entre 45-50 %.

a) Método Homogéneo: se lleva a cabo en dos pasos y a baja temperatura. En el primer paso la Quitina se solubiliza en una solución al 10 % p/v de NaOH por 70 horas (pre-hinchamiento) a temperatura ambiente (paso 1); y seguidamente se deja en contacto con álcali a una concentración mayor al 13 % p/v por un período de 12 a 24 horas y en un rango de temperatura entre 25 a 40 °C (paso 2).

b) Método heterogéneo: ocurre en un solo paso, partiendo de Quitina sólida. La concentración de álcali es más elevada (40-50 % p/v) al igual que las temperaturas de reacción (100-160°C). Bajo estas condiciones, se modifican principalmente las zonas amorfas de la estructura, de allí que el proceso resulte llamado “heterogéneo” [39].

   La variación del tiempo de reacción, temperatura exacta del proceso y la calidad del tratamiento aplicado, son cruciales para garantizar el rendimiento, pureza, propiedades

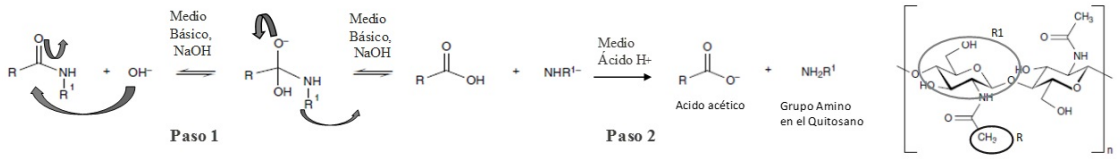


Figura 6: Proceso de N-Deacetilación – Reacción de sustitución nucleofílica de 2 pasos [39]

físico-químicas y mecánicas, peso molecular, grado de deacetilación (DA) deseado e incluso el color del Quitosano final obtenido [7]. En algunos casos, la reacción de deacetilación se lleva a cabo en presencia de Tiofenol o $NaBH_4$ como agentes reductores, o bajo atmósfera de nitrógeno para evitar una degradación de la cadena del biopolímero [50].

El Quitosano resultante es insoluble en solventes orgánicos y agua, sin embargo, resulta soluble en soluciones ácidas, dada la presencia de los grupos aminos protonables. Los ácidos comúnmente empleados son orgánicos, como: fórmico, acético, láctico, pirúvico y oxálico, mientras que los ácidos minerales recomendados son únicamente HCl y HNO_3 [7].

El método heterogéneo ha resultado ser el más idóneo para realizar esta transformación en escala industrial [16]. Ambas opciones, se describen en la Figura 7.

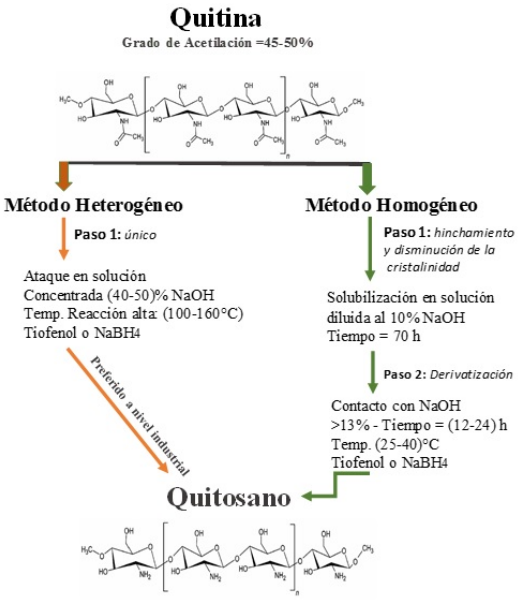


Figura 7: Proceso de N-Deacetilación: Comparación del método homogéneo y heterogéneo

c) Métodos mixtos: Combinaciones del método químico con otras fuentes de irradiación como microondas, han sido recientemente publicados, y sus resultados han sido comparados con el uso de autoclave, demostrando que se puede obtener mayor cristalinidad, viscosidad, alto peso molecular y grado de deacetilación (DA) usando calentamiento microondas, con el cual además se reduce un proceso de horas a pocos minutos [57].

Mientras que combinando con irradiación ultrasonido de alta intensidad, se logró incrementar el rendimiento, propiedades mecánicas y grado de deacetilación desde 77,9 % a 95 % DA, sólo modificando el tiempo de exposición desde ciclos con períodos intermitentes de 30 min a exposición continua por 50 minutos. Sin embargo, se observó severa despolimerización y cambios en la estructura cristalina del Quitosano, por lo que se requiere de más estudios para su completo entendimiento y modulación empleando esta técnica [58, 59].

En algunos casos, se realiza la despolimerización controlada del Quitosano para generar moléculas de menor peso molecular las cuales tienen mejor solubilidad en agua y son requeridas por la biomedicina y agricultura dadas sus actividades antimicrobiales principalmente. Este proceso se realiza bajo método enzimático empleando la enzima *quitinasa*, la cual es capaz de hidrolizar la Quitina generando los llamados quito-oligosacáridos. El empleo de otras enzimas, pueden incluso

modificar la actividad antimicrobiana del Quitosano, por ejemplo, se ha demostrado que al emplear la enzima *chitinase*, el Quitosano despolimerizado inhibe fuertemente bacterias Gram negativas, mientras que al usar enzimas *lysozime*, su acción cambia hacia bacterias Gram positivas [60].

También se ha reportado que la despolimerización puede ocurrir bajo procesos químicos y físicos (incluso asistidos por ultrasonido) [60, 61, 23, 62].

Otro hallazgo interesante resulta la extracción directa de Quitosano mediante procesos de fermentación en estado sólido o líquido empleando especies de hongos como *L.edodes*, de la cual se obtienen grados de deacetilación entre 70-90 % DA con pesos moleculares de 1 a 2×10^5 Da.

El Quitosano extraído de hongos, tiene la ventaja de ser muy homogéneo en tamaño de partícula, y tener un efecto antibacterial. Esta última propiedad, ha sido aprovechada en procedimientos de limpieza de aguas, producción textil y fabricación de cerveza. Además, en el campo de la biomedicina, se emplea para el tratamiento de heridas.

Recientemente, el quitosano extraído de la especie *Arpegillus niger*, ha sido aprobado en Europa como un aditivo para la conservación de alimentos [23].

La Quitina resulta ser el componente principal de la pared celular de los hongos, y forma un complejo con la molécula β-Glucan a través de puentes de hidrógeno. El proceso de transformación a Quitosano, resulta mucho más simple porque no requiere tratamientos agresivos para la remoción de minerales. Por otro lado, el hongo como materia prima para obtener Quitosano, ofrece la ventaja de no ser un producto estacional sino muy abundante en diferentes regiones [40, 24].

De los procesos industriales actuales, se deriva el valor comercial del Quitosano, el cual depende de la fuente (biomasa), pureza, grado de deacetilación (DA), peso molecular y viscosidad intrínseca, entre otras características, las cuales establecen su valor en el mercado. La Tabla 2 muestra datos reales y actualizados sobre las características y el valor comercial del Quitosano α, β,γ, de alta pureza:

Tabla 2: Datos comerciales de los productos Quitosanos α, β, γ

	Quitosano estructura cristalina		
	α	β	γ
Fuente	Camarón	Calamar	Hongo
(%) DA	93,1	93,8	98,2
Peso Molecular Mw (kDa)	890	795	-
Viscosidad (cP)	141	75	21
Aspecto / Color	Polvo Blanco	Polvo Blanco a Beige	Polvo Beige
Valor comercial ($/kg)	152	223,6	304

Fuente: Glentham – Life Sciences – Reino Unido
DA: Grado de Deacetilación

3. Caracterización molecular del Quitosano

El Quitosano puede ser caracterizado por numerosas técnicas y métodos analíticos que definen sus propiedades, características fisicoquímicas y morfológicas. Bajo estos métodos, numerosos autores han validado su estructura molecular, distanciamiento entre las cadenas poliméricas, organización de sus fibras y su cristalinidad (polimorfismo), así como han identificado su red de puentes de hidrógeno y demás grupos funcionales.

Los estudios desarrollados previamente, permitieron revelar como ocurre el hinchamiento en medio acuoso, los cambios de solubilidad y reactividad del Quitosano [49].

Por otro lado, se ha reportado que es posible obtener diferentes resultados experimentales empleando metodologías basadas en distintos principios, por lo tanto, a modo comparativo, siempre se considerará el método de caracterización aplicado [63].

En 1978 Hepburn y Chandler, definieron la Quitina como una molécula viscoelástica, con rigidez, resistencia y extensibilidad que varía de

acuerdo a cada estructura isomórfica α, β, γ [64]. Debido a ello, ganó interés el estudio de las propiedades mecánicas de su derivado Quitosano, las cuales hoy en día se destacan en diversos campos de aplicación.

El grado de deacetilación (DA) y el peso molecular, son las características más críticas en la definición de la funcionalidad del Quitosano. Dependen en gran medida de la cantidad de residuos poliméricos presentes, luego de la reacción de deacetilación. En particular, el peso molecular tiene una influencia directa en la viscosidad intrínseca del producto en medio acuoso.

La pureza, se relacionada con el contenido de cenizas. La ausencia de bacterias, grado de polimerización, contenido de metales pesados, humedad, cristalinidad y polidispersidad, son otras características claves para definir interacciones con sistemas biológicos. Todas estas deben reportarse cuando el Quitosano se destina hacia aplicaciones de consumo humano, biomedicina, biofarmacéutica y agricultura, principalmente. Para aplicaciones industriales varias de estas características son reportadas sólo a petición del consumidor directo [63].

Las técnicas comúnmente aplicadas para realizar análisis fisicoquímicos del Quitosano y sus derivados, son: Difracción RX, Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM), Espectroscopía Infrarroja (FTIR) y Espectroscopía UV-Visible, Cristalografía, Titulación Potenciométrica, Gravimetría, Análisis Termo Gravimétrico (DTG o TGA), Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), Color bajo escala CIELAB, Polarimetría [5, 6, 7, 8, 11, 65, 66, 67, 68].

Más recientemente, otras técnicas más avanzadas, consideran en profundidad el análisis estructural de la molécula de Quitosano, más allá de los fisicoquímicos. Dada la influencia que tiene el proceso de deacetilación parcial o completo del Quitosano, y la presencia de agregados o residuos de grupos acetilos no dispersos completamente en solución acuosa, los resultados reportados varían al aplicar diferentes técnicas. Por esta razón, se recurre a la deacetilación completa de la molécula para aumentar la precisión de los estudios conformacionales [69]. Algunas de las más estudiadas son: Resonancia Magnética Nuclear (RMN), Cromatografía por Permeación de Gel (GPC) [67], Ecuación de Mark-Houwink (relaciona la viscosidad intrínseca con el peso molecular) [70].

Además, la Cromatografía de Exclusión por Tamaños con Detección Múltiple (SEC-MALS), empleada para el análisis conformacional del Quitosano en solución acuosa [67, 69, 71]. Por otro lado, el Modelaje Molecular, establece las características conformacionales entre los enlaces moleculares a través de cálculos y algoritmos [67, 72, 67].

La técnica de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), evidencia cambios morfológicos, y el Aparato de Fuerza Superficial (SFA), es empleado para evaluar interacciones cohesivas en películas conformadas por Quitosano [73, 74, 75].

Para generar despolimerizaciones forzadas del Quitosano y estudiar los efectos en pesos moleculares vs propiedades, se han empleado últimamente la Irradiación Electrónica e-beam (EBI) [76], Gamma [77], Microondas [78], UV [79, 80]. Todas estas técnicas modernas soportan y amplían la caracterización molecular avanzada de la molécula del Quitosano.

3.1. Características estructurales y físico-químicas

A continuación, un resumen de las principales características que pueden ser determinadas bajo diferentes técnicas analíticas básicas y avanzadas que definen la funcionalidad y el análisis estructural de la molécula del Quitosano [5, 6, 7, 8, 11, 65, 66, 67, 70, 72, 81, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 75, 71]:

a) Grado de Deacetilación (DA):
   - Espectroscopía Infrarroja
   - Espectrofotometría UV – Primera derivada
   - Resonancia Magnética Nuclear 1HRMN y 13CRMN
   - Titulación Conductimétrica
   - Titulación Potenciométrica
   - Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

b) Distribución de Peso Molecular Mw y/o Peso Molecular Promedio
   - Viscosimetría
   - Cromatografía de Permeación de Gel (GPC)
   - Ecuación Mark – Houwink
   - Cromatografía SEC – MALS

c) Cristalinidad
   - Difracción de Rayos X

d) Contenido de Humedad
   - Análisis gravimétrico

e) Contenido de Cenizas
   - Análisis gravimétrico

f) Caracterización conformacional
   - Modelaje molecular

g) Cambios morfológicos
   - AFM

h) Interacciones Cohesivas
   - SFA

i) Despolimerización
   - Irradiación Electrónica e-beam, gamma, microondas, UV

4. Derivatización del Quitosano

Numerosas modificaciones pueden ser realizadas hoy en día sobre la molécula del Quitosano para diversificar sus aplicaciones finales, este proceso, conocido como Derivatización, se lleva a cabo por reacciones de sustitución química, elongación de cadenas o despolimerizaciones [19, 35]. Un resumen de estas reacciones químicas se describe en la Figura 8.

Una gran cantidad de trabajos de investigación han sido publicados en la reciente década, reportando reacciones de injerto (grafting): catiónicas, enzimáticas, vía radicales libres o asistidas por radiación. Además, reacciones de copolimerización a través de monómeros, sobre el Quitosano [82, 20, 17], o sobre la Quitina en polvo [83].

También se resaltan reacciones de modificación de grupos funcionales, que incluyen procesos como la formación de derivados aniónicos y anfotéricos del Quitosano N,O- sustituidos bajo carboximetilación [17].

Otros procesos se conocen como: crosslinking o entrecruzamiento químico [80, 82], tiolación, sulfatación (N,O- mono y di-sustituidos), amino-alquilación o metilación y N-acilación. La cuaternización, produce betaínas-quitosanos, a partir de glicina betaína. La oxidación ocurre como N,O- hidroxialquilación (con etil, propil y glicol como los grupos más comunes). Por otro lado, reacciones de hidroxiarilación originan aductos entre el Quitosano y el fenol, bajo una reacción oxidativa enzimática [7, 20, 29, 84, 85, 17].

Además, otras reacciones de mucha importancia son las despolimerizaciones, las cuales ocurren vía hidrólisis, y generan una nueva clase de compuestos derivados denominados Oligosacáridos tipo D-Glucosaminas [8, 60, 61, 23, 29, 25, 62].

Las reacciones de Despolimerización ocurren bajo diversos mecanismos:

a) Físicos: cuando son asistidas por irradiación ultrasonido o microondas.

b) Químicos: vía ácida o radicales libres.

c) Enzimáticos: empleando chitinasa, lipasa, o proteasa.

Recientemente son reportados con mucho interés las relevantes funcionalizaciones iminas, conocidas como quitosanos-bases de Schiff que se emplean ampliamente como grupos protectores para modificaciones sobre el grupo funcional -OH [7, 86, 87].

Otros aportes relevantes a las reacciones de derivatización se basan en procesos químicos de aminación reductiva, a través del cual es posible modificar el Quitosano con carbohidratos (uniéndolo a moléculas de azúcares D, L- como: glucosa, galactosa, lactosa, etc.) [7, 17].

Adicionalmente, este proceso permite modular el carácter hidrofóbico del Quitosano, introduciendo cadenas alquílicas de diferentes longitudes, siguiendo una reacción de N-alquilación [7, 18,

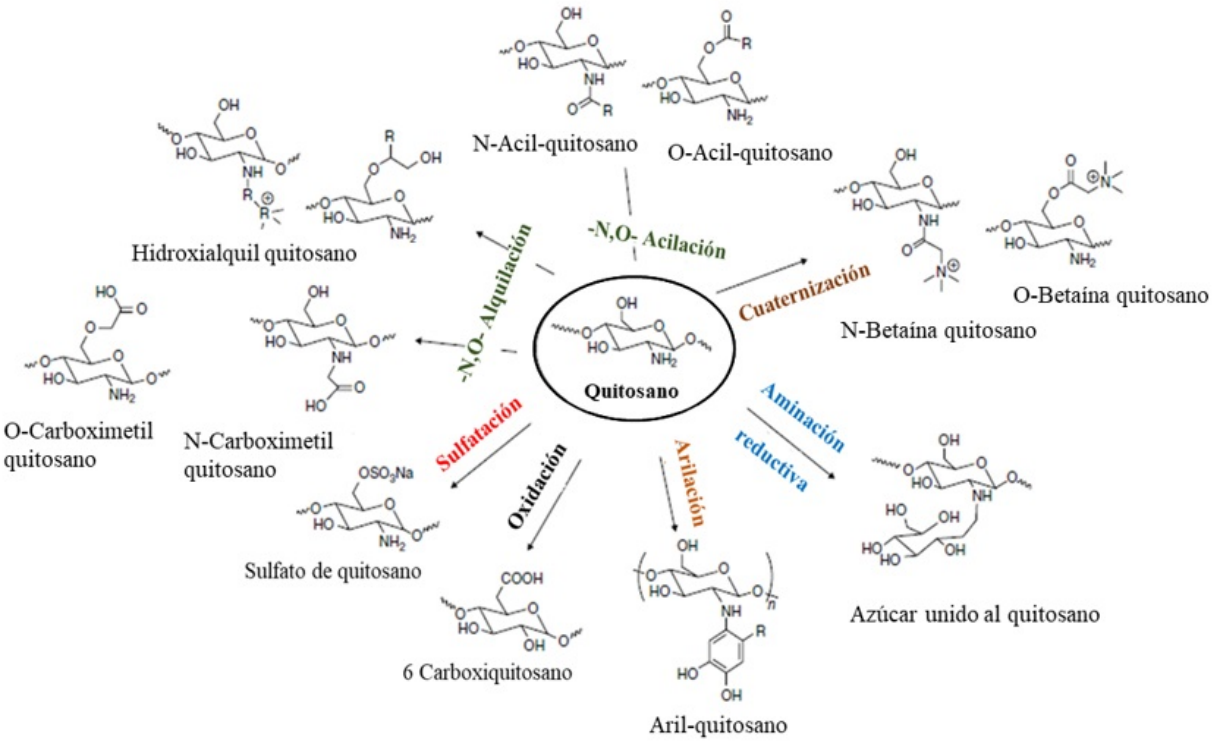


Figura 8: Reacciones de derivatización típicas sobre la molécula de Quitosano [17]

78, 21], lo que deriva en polímeros anfífilos con solubilidad ajustable y propiedades fisicoquímicas diferenciadas.

5. Aplicaciones de los derivados del Quitosano

Las aplicaciones de los biopolímeros Quitina y Quitosano en diferentes campos, se han diversificado a través de la derivatización funcional del Quitosano, lo cual ha permitido desarrollar nuevos y mejores materiales para explorar y explotar al máximo su potencial, especialmente si pueden ser obtenidos siguiendo rutas cada vez más ecoamigables y sustentables que garanticen su participación permanente en cada vez más aplicaciones científicas e industriales.

Ciertamente el Quitosano tiene la ventaja sobre la Quitina de ser más polar y disolverse en medio acuoso ácido (pKa 6.3) por disminuir las repulsiones electrostáticas que le permiten comportarse como un polielectrolito, pero sus derivados, han abierto la posibilidad de modificar esta característica, y ahora, en muchos casos, es posible su solubilización en medios neutros o alcalinos, debido a su capacidad de asociación electrostática con biopolímeros aniónicos y polímeros sintéticos [17].

Esta nueva y relevante característica, permite formar películas [88, 89], hidrogeles [30], membranas [90, 33, 91], además puede formar complejos con óxidos metálicos, celulosa y CMC, entre otros [75]. También se han obtenido micro y nanopartículas, nanofibras [79, 31, 32, 92, 33, 93] y microesferas [91, 34].

Entre otras propiedades, se destacan las características bioadhesivas de los derivados del Quitosano [15, 94, 95, 96], así como su aplicación como un aditivo en el proceso húmedo de fabricación de papel [26, 97, 27].

El siguiente resumen presenta interesantes aplicaciones científicas e industriales, que han sido publicadas en distintos campos de aplicación, describiendo la versatilidad del Quitosano y sus derivados.

5.1. Aplicaciones Científicas. [44, 23, 20, 17, 31, 94, 26, 97, 27, 89, 24, 28, 98, 99, 93, 25]

a) **Alimentos y Bebidas**. Preservante natural de alimentos, fabricación de películas protectoras de empaques de alimentos, clarificante y deacificante de frutas y bebidas, agente espesante y estabilizador, ingrediente nutricional, agente antioxidante, extensión de vida útil de alimentos.
b) **Agricultura**. Bactericidas sintéticos, retención de nutrientes en el suelo, mejora de la calidad y rendimiento de los cultivos, alimento animal.
c) **Industrial (Papelera, Adhesivos)**. Adsorción de iones metálicos, recubrimiento de barrera sobre papel y cartón, aditivo para fabricar papel, adhesivo para papel y cartón, agente deodorizante.
d) **Medio ambiente: Tratamiento de aguas de la industria textil**. Tratamiento de aguas (floculante, adsorbente de tintas). Remoción de mercurio en solución y selectivo para remover metales pesados por técnicas de adsorción.

5.2. Aplicaciones Industriales. [8, 23, 63, 20, 29, 17, 21, 22, 24, 25]

a) **Biotecnología, Biomedicina, Farmacéutica, Cosmética, Bionanotecnología**. Terapia de cáncer, transporte de material genético y medicamentos a través de membranas, microcápsulas y microesferas, transporte morfogenético de huesos antihipertensivo, hipocolesterolémico hipolipidémico, inmunoestimulante, antioxidante, antimicrobiano, antialérgico, anticoagulante, antihongos, cicatrización de heridas, bio-imágenes, ingeniería de tejidos, huesos y piel (regeneración), excipiente en formulaciones de medicamentos, preparación de nano-biodispositivos como nano-cápsulas de carbón, grafito, tungsteno, etc.
b) **Fotografía**. Formador de complejos de plata y películas. Previene difusión de tintas.
c) **Odontología**. Cementos endodónticos, nanobiomateriales de uso dental, implantes orales, Cremas dentales, etc.
d) **Cosmética**. Ingrediente suavizante en fórmulas para el cabello, agentes espesantes, efecto antiestático.
e) **Oftalmología**. Fabricación de lentes de contacto y bandas oculares.

6. Conclusiones

Durante décadas se ha estudiado la molécula de Quitosano con especial interés en conocer su estructura, morfología, características fisicoquímicas y propiedades funcionales. Todas estas han sido publicadas de forma constante a la comunidad científica, alimentando cada vez más el interés por emplear este abundante polisacárido incluso en aplicaciones nunca antes exploradas.

Ya en actualidad, son incontables los trabajos reportados en los cuales se explota el alto potencial biotecnológico de esta molécula y sus derivados. Es tan versátil, que hasta puede ingerirse, curar directamente heridas abiertas, además, un derivado de Quitosano, puede aplicarse sobre alimentos, en cremas y shampoos de uso cosmético, así como ser empleado en diversos campos industriales, como tratamiento de aguas residuales, extracción de metales pesados, entre muchos otros usos.

El Quitosano y sus derivados, tienen una gran ventaja asociada a sus múltiples morfologías, incluyendo: formación de fibras, películas, hidrogeles, membranas, nanopartículas y micropartículas, con muchas propiedades funcionales y bioactividades. Es por ello que todos los esfuerzos que se continúen realizando por mejorar sus técnicas de extracción y reducir los contaminantes químicos residuales, estandarizando nuevas metodologías menos agresivas al medioambiente, y en sí, protegiendo la estructura molecular nativa de este biopolímero, estarán directamente relacionadas con la mejora de los rendimientos y la garantía de la calidad.

Por otro lado, todos estos aportes contribuirán con la reducción de los precios actuales de estos productos en el mercado. Como consecuencia, estarán cada vez más accesibles para ser considerados dentro del desarrollo de más proyectos. Además, esto sería un impulso para transportar las aplicaciones que hoy se han manejado sólo

como investigaciones a escala de laboratorio, hacia procesos industrializados que generen un valor comercial que esté al alcance de todos los consumidores finales.

7. Referencias

[1] B. Moussian, "Targeting Chitin-containing Organisms," in *Advances in Experimental Medicine and Biology*, Q. Yang and T. Fukamizo, Eds. Singapore: Springer, 2019, vol. 1142.

[2] S. Fränkel and A. Kelly, "Beiträge zur Constitution des Chitins," *Monatshefte für Chemie* , vol. 23, pp. 123–132, 1901.

[3] S. Morgulis, "The chemical constitution of chitin," *Science*, vol. 44, no. 1146, pp. 866–867, 1916.

[4] K. H. Meyer and G. W. Pankow, "Sur la constitution et la structure de la chitine," *Helvetica*, vol. 18, pp. 589–598, 1935.

[5] W. Lotmar and L. Picken, "A new crystallographic modification of chitin and its distribution," *Experientia*, vol. 6, pp. 58–59, 1950.

[6] H. Ehrlich, M. Maldonado, K. D. Spindler, C. Eckert, T. Hanke, R. Born, C. Goebel, P. Simon, S. Heinemann, and H. Worch, "First Evidence of Chitin as a Component of the Skeletal Fibers of Marine Sponges.Part I. Verongidae Demospongia: Porifera)," *Journal of Experimental Zoology*, vol. 308, no. B, pp. 347–356, 2007.

[7] K. Kurita, "Chitin and Chitosan: Functional Biopolymers from Marine Crustaceans," *Marine Biotechnology*, vol. 8, pp. 203–226, 2006.

[8] P. Dutta, M. Ravikumar, and J. Dutta, "Chitin and chitosan for versatile applications," *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, vol. 42, no. 3, pp. 307–354, 2002.

[9] D. Carlström, "The cristal structure of chitin (Poly-N-acetyl-D-Glucosamine)," *Journal of Biophysics and Biochem Cytol,*, vol. 3, no. 5, pp. 669–683, 1957.

[10] R. Minke and J. Blackwell, "The Structure of α Chitin," *Journal of Molecular Biology*, vol. 120, no. 2, pp. 167–181, 1978.

[11] H. N. Cuong, N. C. Minh, N. Van Hoa, and T. S. Trung, "Preparation and characterization of high purity β-chitin from squid pens (Loligo chenisis)," *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016.

[12] N. E. Dweltz, "The structure of chitin," *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 44, pp. 416–435, 1961.

[13] K. M. Rudall and W. Kenchington, "The chitin system," *Biological Reviews*, vol. 48, pp. 597–633, 1973.

[14] K. M. Rudall, "The Chitin/Protein Complexes of Insect Cuticles," *Advances in Insect Physiology*, vol. 1, pp. 257–313, 1963.

[15] N. Mati-Baouche, P. Elchinger, H. Baynast, G. Pierre, C. Delattre, and P. Michaud, "Chitosan as an adhesive," *European Polymer Journal*, vol. 60, pp. 198–212, 2014.

[16] M. Yadav, P. Goswami, K. Paritosh, M. Kumar, N. Pareek, and V. Vivekanand, "Seafood waste: a source for preparation of commercially employable chitin/-chitosan materials," *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 6, no. 8, pp. 1–20, 2019.

[17] C. G. Boeriu and L. A. M. van den Broek, "Chemical and Enzymatic Modification of Chitosan to Produce New Functional Materials with Improved Properties," in *Chitin and Chitosan: Properties and Applications*, 1st ed., L. A. M. van den Broek and C. G. Boeriu, Eds. John Wiley & Sons Ltd., 2019, ch. 10.

[18] J. Desbrieres, "Autoassociative natural polymer derivatives: the alkylchitosans. Rheological behaviour and temperature stability," *Polymer*, vol. 45, no. 10, pp. 3285–3295, 2004.

[19] K. V. Harish and R. N. Tharanathan, "Chitin/chitosan: modifications and their unlimited application potential an overview," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 117–131, 2007.

[20] N. M. Alves and J. F. Manoa, "Chitosan derivatives obtained by chemical modifications for biomedical and environmental applications," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 43, no. 5, pp. 401–414, 2008.

[21] M. S. R. Rajoka, L. Zhao, H. M. Mehwish, Y. Wu, and S. Mahmood, "Chitosan and its derivatives: synthesis, biotechnological applications, and future challenges," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 103, pp. 1557–1571, 2019.

[22] E. I. Rabea, M. E. T. Badawy, C. V. Stevens, G. Smagghe, and W. Steurbaut, "Chitosan as Antimicrobial Agent: Applications and Mode of Action," *Biomacromolecules*, vol. 4, no. 6, pp. 1457–1465, 2003.

[23] T. Philibert, B. H. Lee, and N. Fabien, "Current Status and New Perspectives on Chitin and Chitosan as Functional Biopolymers," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 181, pp. 1314–1337, 2017.

[24] R. N. Tharanathan and F. S. Kittur, "Chitin-The Undisputed Biomolecule of Great Potential," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 43, no. 1, pp. 61–87, 2003.

[25] G. Crini, "Historical Landmarks in the Discovery of Chitin," in *Sustainable Agriculture Reviews 35. Sustainable Agriculture Reviews*, 1st ed., G. Crini and E. Lichtfouse, Eds. Springer, Cham, 2019, vol. 35.

[26] R. Nicu, E. Bobu, and J. Desbrieres, "Chitosan as cationic polyelectrolyte in wet-end papermaking systems," *Cellulose Chemistry and Technology*, vol. 45, no. 1–2, pp. 105–111, 2011.

[27] S. Habibie, M. Hamzah, M. Anggaravidya, and E. Kalembang, "The effect of chitosan on physical and mechanical properties of paper," *Journal of Chemical Engineering and materials Science*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2016.

[28] D. I. Hefft, "Effects of Chitosan Coated Paperboard

Trays on the *Botrytis cinerea* Formation and Sensory Quality of Bilberries (*Vaccinium myrtillus L.*) and Redcurrants (*Ribes rubrum L.*)," *International Journal of Fruit Science*, vol. 18, no. 3, pp. 300–306, 2018.

[29] M. N. V. Ravi Kumar, R. A. A. Muzzarelli, C. Muzzarelli, H. Sashiwa, and A. J. Domb, " Chitosan Chemistry and Pharmaceutical Perspectives," *Chemical Reviews*, vol. 104, no. 12, pp. 6017–6084, 2004.

[30] N. Bhattarai, J. Gunn, and M. Zhang, "Chitosan based hydrogels for controlled, localized drug delivery," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 62, no. 1, pp. 83–99, 2010.

[31] M. S. Thomas, R. R. Koshy, S. K. Mary, S. Thomas, and L. A. Pothan, "Starch, Chitin and Chitosan Based Composites and Nanocomposites," in *Springer Briefs in Molecular Science. Biobased Polymers*, 1st ed. Springer, 2019.

[32] M. Zhengxin, A. Garrido-Maestu, and K. C. Jeong, "Application, mode of action, and in vivo activity of chitosan and its micro and nanoparticles as antimicrobial agents: A review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 176, pp. 257–265, 2017.

[33] D. Yang, L. Li, B. Chen, S. Shi, J. Nie, and G. Ma, "Functionalized chitosan electrospun nanofiber membranes for heavy-metal removal," *Polymer*, vol. 163, pp. 74–85, 2019.

[34] A. K. d. S. Pereira, D. T. Reis, K. M. Barbosa, G. N. Scheidt, L. S. da Costa, and L. S. S. Santos, "Antibacterial effects and ibuprofen release potential using chitosan microspheres loaded with silver nanoparticles," *Carbohydrate Research*, vol. 488, p. 107891, 2020.

[35] X. Chen and N. Yan, *Conversion of Chitin to Nitrogen-containing Chemicals*, 1st ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2020, ch. 14.

[36] K. Kramer and D. Koga, "Mini review-Insect Chitin Physcal State, Synthesis, Degradation and Metabolic Regulation," *Insect Biochemistry*, vol. 16, no. 6, pp. 851–877, 1986.

[37] N. Subhapradha, P. Ramasamy, V. Shanmugam, P. Madeswaran, A. Srinivasan, and A. Shanmugam, "Physicochemical characterisation of β-chitosan from Sepioteuthis lessoniana gladius," *FoodChemistry*, vol. 141, no. 2, pp. 907–913, 2013.

[38] G. Chaussard and A. Domard, "New Aspects of the Extraction of Chitin from Squid Pens," *Biomacromolecules*, vol. 5, no. 2, pp. 559–564, 2004.

[39] L. Bastiaens, L. Soetemans, E. D'Hondt, and K. Elst, *Chitin and Chitosan: Properties and Applications*, 1st ed., L. A. M. van den Broek and C. G. Boeriu, Eds. John Wiley & Sons Ltd., 2020.

[40] G. S. Dhillon, S. Kaur, S. K. Brar, and M. Verma, "Green synthesis approach: extraction of chitosan from fungus mycelia," *Journal Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 33, no. 4, pp. 379–403, 2013.

[41] M. Jones, M. Kujundzic, S. John, and A. Bismarck, "Crab vs. Mushroom: A Review of Crustacean and Fungal Chitin in Wound Treatment," *Marine Drugs*, vol. 18, no. 1, pp. 1–23, 2020.

[42] M. Kaya, O. Seyyar, T. Baran, S. Erdogan, and M. Kar, "A physicochemical characterization of fully acetylated chitin structure isolated from two spider species: With new surface morphology," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 65, pp. 553–558, 2014.

[43] E. B. Ibitoye, I. H. Lokman, M. N. M. Hezmee, Y. M. Goh, A. B. Z. Zuki, and A. A. Jimoh, "Extraction and physicochemical characterization of chitin and chitosan isolated from house cricket," *Biomedical Materials*, vol. 13, no. 2, pp. 1–18, 2018.

[44] K. De la Caba, P. Guerrero, T. S. Trung, M. Cruz-Romero, J. P. Kerry, J. Fluhr, M. Maurer, F. Kruijssen, A. Albalat, S. Bunting, S. Burt, D. Little, and R. Newton, "From seafood waste to active seafood packaging: An emerging opportunity of the circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 86–98, 2019.

[45] S. F. Bruno, F. J. A. A. Ekorongb, S. S. Karkal, M. S. B. Cathrine, and T. G. Kudre, "Green and innovative techniques for recovery of valuable compounds from seafood by-products and discards: A review. ," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 85, pp. 10–22, 2019.

[46] M. S. Rao, J. Muñoz, and W. F. Stevens, "Critical factors in chitin production by fermentation of shrimp biowaste," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 54, pp. 808–813, 2000.

[47] W. Arbia, L. Arbia, L. Adour, and A. Amrane, "Chitin Extraction from Crustacean Shells Using Biological Methods – A Review," *Food Technology and Biotechnology*, vol. 51, no. 1, pp. 12–25, 2013.

[48] W. J. Jung, G. H. Jo, J. H. Kuk, Y. J. Kim, K. T. Oh, and R. D. Park, "Production of chitin from red crab shell waste by successive fermentation with *Lactobacillus paracasei* KCTC-3074 and *Serratia marcescens* FS-3," *Carbohydrate Polymers*, vol. 68, no. 4, pp. 746–750, 2007.

[49] I. Younes and M. Rinaudo, "Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications," *Marine Drugs*, vol. 13, no. 3, pp. 1133–1174, 2015.

[50] A. Tolaimate, J. Desbrieres, M. Rhazi, and A. Alagui, "Contribution to the preparation of chitins and chitosans with controlled physico-chemical properties," *Polymer*, vol. 44, pp. 7939–7952, 2003.

[51] A. Percot, C. Viton, and A. Domard, "Optimization of Chitin Extraction from Shrimp Shells," *Biomacromolecules*, vol. 4, no. 1, pp. 12–18, 2003.

[52] H. K. No and E. Y. Hur, "Control of Foam Formation by Antifoam during Demineralization of Crustacean Shell in Preparation of Chitin," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 46, no. 9, pp. 3844–3846, 1998.

[53] N. Acosta, C. Jiménez, V. Borau, and A. Heras,

"Extraction and Characterization of chitin from crustaceans," *Biomass and Bioenergy*, vol. 5, no. 2, pp. 145–153, 1993.

[54] A. Khanafari, R. Marandi, and S. Sanatei, "Recovery of chitin and chitosan from shrimp waste by chemical and microbial methods," *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 19–24, 2008.

[55] M. N. Marzieh, F. Zahra, E. Tahereh, and K. N. Sara, "Comparison of the physicochemical and structural characteristics of enzymatic produced chitin and commercial chitin," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 139, pp. 270–276, 2019.

[56] T. G. Kudre, N. Bhaskar, and P. Z. Sakhare, "Optimization and characterization of biodiesel production from rohu (*Lbeo rohita*) processing waste," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 1408–1418, 2017.

[57] A. Alishahi, A. Mirvaghef, M. R. Tehrani, H. Farahmand, S. A. Shojaosadati, F. A. Dorkoosh, and M. Z. Elsabee, "Enhancement and Characterization of Chitosan Extraction from the Wastes of Shrimp Packaging Plants," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 19, pp. 776–783, 2011.

[58] W. G. Birolli, J. A. d. Delezuk, and S. P. Campana-Filho, "Ultrasound-assisted conversion of alpha-chitin into chitosan," *Applied Acoustics*, vol. 103 Part B, pp. 239–242, 2015.

[59] A. Fiamingo, J. A. d. Delezuk, S. Trombotto, L. David, and S. Campana-Filho, "Extensively deacetylated high molecular weight chitosan from the multistep ultrasound-assisted deacetylation of beta-chitin," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 32, pp. 79–85, 2016.

[60] J. Jung and Y. Zhao, "Characteristics of deacetylation and depolymerization of β-chitin from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) pens," *Carbohydrate Research*, vol. 346, no. 13, pp. 1876–1884, 2011.

[61] S. B. Lin, Y. C. Lin, and H. H. Chen, "Low molecular weight chitosan prepared with the aid of cellulase, lysozyme and chitinase: Characterisation and antibacterial activity," *Food Chemistry*, vol. 116, no. 1, pp. 47–53, 2009.

[62] G. Cui, J. Guo, Y. Zhang, Q. Zhao, S. Fu, T. Han, S. Zhang, and Y. Wu, "Chitosan Oligosaccharide Derivatives as Green Corrosion Inhibitors for P110 Steel in a Carbon-dioxide-saturated Chloride Solution," *Carbohydrate Polymers*, vol. 203, pp. 386–395, 2018.

[63] I. Aranaz, M. Mengíbar, R. Harris, I. Paños, B. Miralles, N. Acosta, G. Galed, and A. Heras, "Functional Characterization of Chitin and Chitosan," *Current Chemical Biology*, vol. 3, no. 2, pp. 203–230, 2009.

[64] H. R. Hepburn and H. D. Chandler, "Tensile mechanical properties and transconformational changes of chitin," in *Proceedings of the 1st International Conference on Chitin and Chitosan*, vol. 78, M.I.T. Massachusetts, 1978, pp. 124–143.

[65] J. Brugnerotto, J. Lizardi, F. M. Goycoolea, W. Argüelles-Monal, J. Desbrières, and M. Rinaudo, "An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization," *Polymer*, vol. 42, pp. 3569–3580, 2001.

[66] G. L. Clark and A. F. Smith, "X Ray Difraction Studies of Chitin, Chitosan and Derivates," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 40, no. 7, pp. 863–879, 1936.

[67] J. Brugnerotto, J. Desbrières, L. Heux, K. Mazeau, and M. Rinaudo, "Overview on structural characterization of chitosan molecules in relation with their behavior in solution," *Macromolecular Symposia*, vol. 168, no. 1, pp. 1–20, 2001.

[68] C. A. Ramírez Barragán, E. Delgado Fornué, and J. A. Andrade Ortega, "Determinación del grado de desacetilación de quitosana mediante titulación potenciométrica, FTIR y Raman," *Journal Coloquio de Investigación Multidisciplinaria*, vol. 4, no. 1, pp. 769–776, 2016.

[69] M. Yanagisawa, Y. Kato, Y. Yoshida, and A. Isogai, "SEC-MALS study on aggregates of chitosan molecules in aqueous solvents: Influence of residual N-acetyl groups," *Carbohydrate Polymers*, vol. 66, no. 2, pp. 192–198, 2006.

[70] W. Wang, S. Bo, S. Li, and W. Qin, "Determination of the Mark-Houwink equation for chitosans with different degrees of deacetylation," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 13, no. 5, pp. 281–285, 1991.

[71] R. G. Beri, J. Walker, E. T. Reese, and J. E. Rollings, "Characterization of chitosans via coupled size-exclusion chromatography and multiple-angle laser light-scattering technique," *Carbohydrate Research*, vol. 238, pp. 11–26, 1993.

[72] K. Suknuntha, V. Tantishaiyakul, V. Vao-Soongnern, Y. Espidel, and T. Cosgrove, "Molecular Modeling Simulation and Experimental Measurements to Characterize Chitosan and Poly(vinyl pyrrolidone) Blend Interactions," *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, vol. 46B, pp. 1258–1264, 2008.

[73] S. Brown, B. Moudgil, Y. Rabinovich, V. Anthony, and M. Kamal, "Materials and methods for identifiying biointeractive nanostructures and/or nanoparticles." United States Patent Patent US 7.908.908 B2, 2011.

[74] L. Xiang, L. Gong, J. Zhang, L. Zhang, W. Hu, W. Wang, Q. Lu, and H. Zeng, "Probing Molecular Interactions of PEGylated Chitosan in Aqueous Solutions Using Surface Forces Apparatus," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 21, no. 37, pp. 20 571–20 581, 2019.

[75] N. Nordgren, P. Eronen, M. Österberg, J. Laine, and M. W. Rutland, "Mediation of the Nanotribological Properties of Cellulose by Chitosan Adsorption," *Biomacromolecules,* , vol. 10, no. 3, pp. 645–650, 2009.

[76] S. H. Jo, C. Choi, and S. K. Choi, "Depolymerization of α- & β-Chitosan by e-Beam Irradiation," *Journal of*

Biosciences and Medicines, vol. 7, no. 10, pp. 72–83, 2019.

[77] D. Tahtat, M. Mahlous, S. Benamer, A. N. Khodja, and S. L. Youcef, "Effect of molecular weight on radiation chemical degradation yield of chain scission of γ-irradiated chitosan in solid state andin aqueous solution," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 81, no. 6, pp. 659–665, 2012.

[78] C. Petit, S. Reynaud, and J. Desbrieres, "Amphiphilic derivatives of chitosan using microwave irradiation. Toward an eco-friendly process to chitosan derivatives," *Carbohydrate Polymers*, vol. 116, pp. 26–33, 2015.

[79] L. Zhang, X. Zhu, H. Sun, G. Chi, J. Xu, and Y. Sun, "Control synthesis of magnetic Fe_3O_4-chitosan nanoparticles under UV irradiation in aqueous system," *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 3, pp. 828–833, 2009.

[80] D. Alonso, M. Gimeno, R. Olayo, H. Vázquez-Torres, J. D. Sepúlveda-Sánchez, and K. Shirai, "Cross-linking chitosan into UV-irradiated cellulose fibers for the preparation of antimicrobial-finished textiles," *Carbohydrate Polymers*, vol. 77, no. 3, pp. 536–543, 2009.

[81] B. Prathab and T. M. Aminabhavi, "Atomistic Simulations to Compute Surface Properties of Poly(N-vinyl-2-pyrrolidone) (PVP) and Blends of PVP/Chitosan," *Langmuir*, vol. 23, no. 10, pp. 5439–5444, 2007.

[82] M. J. Zohuriaan-Mehr, "Advances in Chitin and Chitosan Modification through Graft Copolymerization: A Comprehensive Review," *Iranian Polymer Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 235–265, 2005.

[83] K. Kurita, M. Kawata, Y. Koyama, and S. I. Nishimura, "Graft copolymerization of vinyl monomers onto chitin with cerium (IV) ion," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 42, no. 11, pp. 2885–2891, 1991.

[84] M. N. V. Ravi Kumar, "A review of chitin and chitosan applications," *Reactive & Functional Polymers*, vol. 46, no. 1, pp. 1–27, 2000.

[85] J. Huang, Z. H. Cheng, H. H. Xie, J. Y. Gong, J. Lou, Q. Ge, Y. J. Wang, Y. F. Wu, S. W. Liu, P. L. Sun, and J. W. Mao, "Effect of quaternization degree on physiochemical and biological activities of chitosan from squid pens," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 70, pp. 545–550, 2014.

[86] R. Antony, T. Arun, and S. T. D. Manickam, "A review on applications of chitosan-based Schiff bases," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 129, pp. 615–633, 2019.

[87] L. Wei, W. Tan, G. Wang, Q. Li, F. Dong, and Z. Guo, "The antioxidant and antifungal activity of chitosan derivatives bearing Schiff bases and quaternary ammonium salts," *Carbohydrate Polymers*, vol. 226, p. 115256, 2019.

[88] B. Lepoittevin, T. Elzein, D. Dragoe, A. Bejjani, F. Lemée, J. Levillain, P. Bazin, P. Roger, and I. Dez, "Hydrophobization of chitosan films by surface grafting with fluorinated polymer brushes," *Carbohydrate Polymers*, vol. 205, pp. 1–30, 2018.

[89] H. Wang, J. Qian, and F. Ding, "Emerging Chitosan Based Films for Food Packaging Applications," *Journal of Agricultural Food Chemistry*, vol. 66, no. 2, pp. 395–413, 2018.

[90] W. Y. Cheah, P. L. Show, I. S. Ng, G. Y. Lin, C. Y. Chiu, and Y. K. Chang, "Antibacterial activity of quaternized chitosan modified nanofiber membrane," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 126, pp. 569–577, 2019.

[91] W. Zhang, Q. Li, Q. Mao, and G. He, "Cross-linked chitosan microspheres: An efficient and eco-friendly adsorbent for iodide removal from waste water," *Carbohydrate Polymers*, vol. 209, pp. 215–222, 2019.

[92] J. D. Schiffman and C. L. Schauer, "Cross-Linking Chitosan Nanofibers," *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 2, pp. 594–601, 2007.

[93] K. Chi and J. M. Catchmark, "Improved eco-friendly barrier materials based on crystalline nanocellulose/chitosan/ carboxymethyl cellulose polyelectrolyte complexes," *Food Hydrocolloids*, vol. 80, pp. 195–205, 2018.

[94] X. Ji, L. Bin, Y. Bingnan, and G. Minghui, "Preparation and characterizations of a chitosan-based medium-density fiberboard adhesive with high bonding strength and water resistance," *Carbohydrate Polymers*, vol. 176, pp. 273–280, 2017.

[95] A. K. Patel, J. D. Mathias, and P. Michaud, "Polysaccharides as Adhesives: A Critical Review," *Reviews of Adhesion and Adhesives*, vol. 1, no. 3, pp. 312–345, 2013.

[96] N. Mati-Baouche, C. Delattre, H. de Baynast, M. Grédiac, J. D. Mathias, A. V. Ursu, J. Desbrières, and P. Michaud, "Molecules Alkyl-Chitosan-Based Adhesive: Water Resistance Improvement," *Molecules*, vol. 24, no. 10, pp. 1–12, 2019.

[97] K. Khwaldia, E. Arab-Tehrany, and S. Desobry, "Biopolymer Coatings on Paper Packaging Materials," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 9, no. 1, pp. 82–91, 2010.

[98] G. Crini, "Non conventional low cost adsorbents for dye removal: A review," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 9, pp. 1061–1085, 2006.

[99] M. B. Kasiri, "Application of chitosan derivatives as promising adsorbents for treatment of textile wastewater. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology,," in *The Textile Institute Book Series*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2019, ch. 14 - Application of chitosan derivatives as promising adsorbents for treatment of textile wastewater.

Breve reseña de los autores

Alied Romero–Serrano

Lic. Alied Romero, Química Investigadora con 20 años de experiencia en el campo de *I+D+i* de productos químicos con aplicación industrial, cubriendo las líneas de Surfactantes, Cosméticos, Emulsiones Asfálticas y Síntesis de Química Fina. Actualmente desarrolla Adhesivos PSA para la industria de cintas y etiquetas autoadhesivas.

Profesor Dr. Juan C. Pereira

Juan C. Pereira obtuvo un B.Sc. en química y un M.Sc. en Química de la Universidad Central de Venezuela (Venezuela), así como un doctorado de la Universidad de los Andes (Mérida–Venezuela). Durante los últimos 23 años ha estado involucrado en la enseñanza y la investigación en la Universidad de Carabobo (Carabobo – Venezuela), donde es Director del Laboratorio de PHD. Actualmente es profesor titular y consultor industrial en fenómenos interfaciales con aplicaciones en la producción de petróleo, hidrocoloides alimentarios y química agrícola.

Effect of the arrangement of drip irrigation laterals and partial soil drying on potato yield

Miguel Sánchez-Delgado *,[a], Jesús A. Mejía-Marcacuzco [a], Edilberto Guevara-Pérez [a], Piero Natividad-Toribio [b], Luis Razuri-Ramírez [c]

[a] *Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.*

[b] *Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.*

[c] *Programa de Maestría en Riego y Drenaje, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.*

Abstract.- In the present investigation, the effect of the disposition of the drip irrigation laterals on the potato yield was evaluated, using the partial drying of roots SPR, replacing a sheet of water of 100 and 50 % of the evapotranspiration of the crop ETc. The experimental design was made based on the Completely Random Factorial Design considering two factors: (a) types of lateral arrangement (T-1 parallel arrangement and T-2 linear arrangement) and (b) irrigation types (100 % ETc SPR1 and 50 % ETc SPR2), obtaining four treatments as a result. The application of the SPR was carried out in two periods: the first, between days 20-29 after planting (during growth) and the second, between days 76-94 after planting (during maturity). Total and commercial yield as well as water productivity were evaluated. The results show that the type of irrigation had a greater incidence in the total yield of the crop with yields between 61 and 64 t/ha, while the disposition factor had a greater incidence in the commercial yield with yields between 51 and 60 t/ha. Water use efficiency varied between 38 and 47 kg/m^3.

Keywords: drip irrigation; partial wetting; partial irrigation; potato yield.

Efecto de la disposición de laterales de riego por goteo y secado parcial del suelo en el rendimiento de papa

Resumen.- En la presente investigación se evaluó el efecto de la disposición de los laterales de riego por goteo en el rendimiento de la papa, utilizando el secado parcial de raíces SPR, reponiendo una lámina de agua de 100 y 50 % de la evapotranspiración del cultivo ETc. El diseño experimental se efectuó en base al Diseño Factorial Completamente al Azar considerando dos factores: (a) tipos de disposición de lateral (Disposición paralela T-1 y Disposición lineal T-2) y (b) tipos de riego (100 % ETc SPR1 y 50 % ETc SPR2), obteniendo como resultado cuatro tratamientos. La aplicación del SPR se realizó en dos periodos: el primero, entre los días 20-29 después de la siembra (durante el crecimiento) y el segundo, entre los días 76-94 después de la siembra (durante la madurez). Se evaluó el rendimiento total y comercial, así como la eficiencia en el uso del agua. Los resultados muestran que el tipo de riego tuvo mayor incidencia en el rendimiento total del cultivo con rendimientos entre 61 y 64 t/ha, mientras que el factor disposición tuvo mayor incidencia en el rendimiento comercial con rendimientos entre 51 y 60 t/ha. La eficiencia de uso del agua varió entre 38 y 47 kg/m^3.

Palabras clave: riego por goteo; humedecimiento parcial; riego parcial; rendimiento de papa.

Recibido: 13 de mayo, 2020.
Aceptado: 20 de julio, 2020.

1. Introducción

La papa es uno de los cuatro cultivos alimenticios más importantes del mundo junto al trigo, arroz y maíz y el segundo más importante de la agricultura del Perú, después del maíz. Representa el 10,6 % del Valor Bruto de la Producción (VBP) del sub sector agrícola y es el sustento de más de 710 mil familias. En el Perú, el consumo per cápita anual

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*msanchez@lamolina.edu.pe (M. Sánchez-Delgado)

en el año 2016 se incrementó de 67 a 87 kilos y se estima que suba hasta los 100 kilos por persona hasta el 2021. En la actualidad el país es el primer productor de papa de américa del sur y el segundo de toda américa latina; sin embargo, el rendimiento de la producción con apenas 14,7 t/ha, es superado por el de los países vecinos como Ecuador con 18,4 t/ha, Colombia con 20 t/ha, Brasil con 27,9 t/ha y Chile con 21,6 t/ha; y es inferior en un 26 % al promedio mundial [1]. Las cifras mencionadas indican que en las zonas áridas y semiáridas se requieren soluciones basadas en nuevas estrategias de riego y de gestión del agua en la agricultura [2]. Una de las estrategias que se puede aplicar es el método del secado parcial de la zona de raíces (SPR) en cada riego, mientras la otra parte de dicha zona se deja secar a un cierto contenido de humedad del suelo antes de volver a humedecer el lado seco cambiando el riego a ese lado; de ese modo, el SPR se constituye en una técnica de riego que permite optimizar el uso del recurso hídrico. El concepto de SPR fue aplicado por primera vez por Grimes *et al.* [3] en EE.UU.; luego, se ha probado en varios cultivos hortícolas y árboles frutales, tal como en frijol [4], [5], la remolacha azucarera [6], uvas [7], [8], maíz [9]; frijol verde [10], manzana [11] y tomate [12], [13]. En países como China, donde se ha experimentado una disminución de los recursos hídricos, se fomenta una gran atención pública a la agricultura, y se desarrollan estrategias de riego innovadoras en comparación con los métodos de riego convencionales, para ahorrar agua y aumentar la eficiencia del uso del agua(EUA) [14], [15], [16]. El procedimiento SPR se ha aplicado con éxito en el cultivo de papa, reduciendo el consumo de agua entre un 30 a 50 % con un aumento de la EUA, sin reducción significativa del rendimiento del tubérculo [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30].

Sin embargo, los desafíos del método SPR incluyen aspectos como encontrar el momento adecuado para su aplicación, la duración y la intensidad del manejo de la restricción de agua en la papa que estimule algún mecanismo de tolerancia para evitar la reducción del rendimiento [31]. Los hallazgos recientes, trabajando en papa bajo invernadero [24] y en las condiciones de campo [19], [20], [32], destacan que un momento temprano de la restricción de agua (a partir de 6 semanas después de la siembra) con SPR utilizando el 50 % de la cantidad de agua aplicada con riego completo, permite una alta EUA sin reducciones significativas de rendimiento mediante la activación de rasgos de tolerancia a la sequía, como el ajuste osmótico. En ese contexto, en la presente investigación se evaluó el efecto de la disposición de los componentes laterales de un sistema de riego por goteo en el rendimiento de la papa, utilizando el método del secado parcial de la zona de raíces SPR, reponiendo láminas de agua equivalentes al 100 y 50 % de la ETc del cultivo.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

La investigación se desarrolló en la parcela experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA), en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) cuya ubicación geográfica es: Latitud sur 12° 4'54", longitud oeste 76° 56'50"y altitud de 240 msnm, durante los meses de junio a octubre del 2017. El suelo presentó una textura franca arenosa con una capacidad de campo de 20,7 %, punto de marchitez permanente de 8,7 % y densidad aparente de 1,45 g/cm^3.

2.2. Material vegetal y aplicación del diseño

Como material vegetal se utilizó la papa de la variedad UNICA, semillas evaluadas y seleccionadas por sus buenas características agronómicas y bromatológicas. La siembra se realizó el 14 de junio del 2017. La investigación está basada en un Diseño Factorial Completamente al Azar (D.F.C.A). Se consideraron dos factores: (a) dos tipos de disposición de lateral: Disposición 1 y Disposición 2) y (b) dos tipos de riego: al 100 % de ETc –"T" y al 50 % de ETc – "RP"), obteniendo como resultado cuatro tratamientos SPR denominados disposición paralela, con lámina de riego al 50 % de ETc en SPR (SPR1), disposición paralela, con lamina de riego al 100 % de ETc (T-1), disposición lineal, con lámina de riego al 50 % de ETc en SPR (SPR2) y disposición lineal, con lamina de riego al 100 % del ETc (T-2). El área

neta del campo experimental fue de 270 m^2 la cual se dividió en 20 parcelas experimentales de 3,00 m x 4,50 m (13,5 m^2) cada una con 5 repeticiones; se utilizó un total de 45 plantas. La aplicación de los fertilizantes fue a través del sistema de riego con la siguiente dosis: 115 kg N/ha, 234 kg P_2O_5/ha , 196 kg K_2O/ha, 59,6 kg CaO/ha, 32,4 kg MgO/ha y 26,3 kg S/ha.

2.3. *Consumo de agua del cultivo*

Las variables climáticas registradas en la estación meteorológica de la Estación del departamento de recursos hídricos de la UNALM fueron la temperatura máxima T_{max} (°C), temperatura mínima T_{min} (°C), humedad relativa HR (%), velocidad del viento Vv (m/s), precipitación Pp (mm) y la evaporación del tanque clase A Ev (mm). En la Tabla 1, se presentan los valores de dichas variables climáticas registrados durante el periodo de investigación, el mismo que se extendió desde el 14 de junio de 2017 hasta el 30 de septiembre del mismo año.

Tabla 1: Datos meteorológicos mensuales

Mes	Vv	T(°C)		HR	Ev	ETo
	(m/s)	Max	Min	(%)	(mm)	(mm/d)
Jun	1,12	22,2	14,9	89,63	1,85	1,48
Jul	1,15	21,6	13,5	88,12	1,93	1,54
Ago.	1,18	20,1	13,3	90,85	1,58	1,26
Set	1,1	22,1	13,3	91,95	1,69	1,35

El cálculo de la lámina de riego se efectuó a partir de la medida de la evaporación en el tanque clase "A", siendo el coeficiente del tanque $Kp = 0,80$ obteniéndose primeramente la evapotranspiración del cultivo de referencia a través de la ecuación (1):

$$ETo = E \cdot Kp. \quad (1)$$

La evapotranspiración real (ETc), se determinó multiplicando la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) por el coeficiente del cultivo (Kc) según la ecuación (2):

$$ETc = ETo \cdot Kc. \quad (2)$$

El coeficiente Kc se tomó de referencias sobre estudios desarrollados en la región de la costa de Arequipa, cuyos valores se dan en la Tabla 2.

Tabla 2: Coeficiente de cultivo [33]

Periodo vegetativo (Semanas)	Kc
1 -4	0,30
5 - 7	0,60
8 - 10	1,10
11 - 13	1,35
14 - 15	1,20
105 DÍAS	

2.4. *Disposición de los laterales de riego*

En la Figura 1 se muestran los dos tipos de disposición de los laterales de riego. En el tipo 1 (paralela), en cada surco se instalaron dos mangueras de riego a una distancia de 20 cm unas de la otra; los emisores fueron colocados a un espaciamiento de 30 cm entre planta y planta. En la disposición de lateral tipo 2 (lineal) en cada surco se instaló una manguera con emisores cada 30 cm en el tratamiento control; en el caso de las unidades con riego mediante el secado parcial de la zona de raíces, se utilizaron dos mangueras juntas con emisores alternados y distanciados cada 60 cm en cada una de ellas.

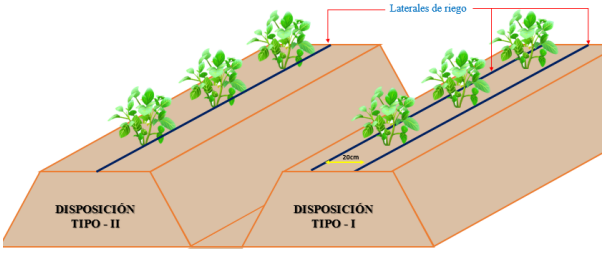


Figura 1: Disposición de laterales de riego

El secado parcial del suelo en la zona de raíces (SPR) al 50 % del ETc (SPR1 y SPR2) consistió en humedecer la mitad de la zona radicular de la planta, con una lámina de riego reducida al 50 % de ETc; esta aplicación se hizo de manera temporal en dos etapas del desarrollo fenológico

de la planta, crecimiento y madurez, considerando que son etapas donde la restricción de agua no es influyente en la determinación del rendimiento. Los riegos control al 100 % de ETc (T-1 y T-2) se realizaron de manera uniforme en todas las unidades experimentales durante todo el proceso productivo del cultivo. En ambas alternativas la frecuencia de aplicación del agua de riego fue de un día.

2.5. *Aplicación de la lámina de riego*

El riego parcial se aplicó en dos de los cuatro estados fenológicos de la papa, el primero en la etapa de crecimiento (II) y el segundo en la etapa de madurez (IV). En la Figura 2 se presenta el cronograma de aplicación del agua en semanas después de la siembra; en la figura se muestran los períodos de aplicación del riego deficitario con secado parcial de la zona de raíces.

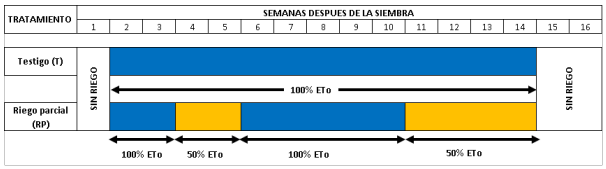


Figura 2: Cronograma de aplicación del agua en los tratamientos de riego

Según la disposición del experimento, el coeficiente de uniformidad CU fue superior a 89 %, en los tratamientos control (T-1 y T-2) con aplicación de las láminas de riego al 100 % de ETc, durante todas las aplicaciones de riego, debido a que las parcelas experimentales se regaron de forma uniforme. La aplicación restringida de agua para el caso de los tratamientos SPR, se llevó a cabo durante dos etapas fenológicas del cultivo. En las Figuras 3 y 4 se presenta una vista en planta de la disposición lineal y en paralelo, respectivamente y la aplicación del riego deficitario con secado parcial del suelo en la zona de raíces; las figuras muestran el modo cómo se alterna el humedecimiento de la zona de raíces en cada planta; a cada línea lateral se acopló una válvula de paso para el control del flujo. El inicio de la aplicación SPR ocurre al pasar agua por uno de los laterales; por ejemplo, la línea "A" queda abierta mientras que la línea "B" permanece cerrada; en el riego siguiente se invierte la operación, la línea "A" cerrada y la línea "B" abierta; de esta forma se humedece la zona de raíces en forma alternada.

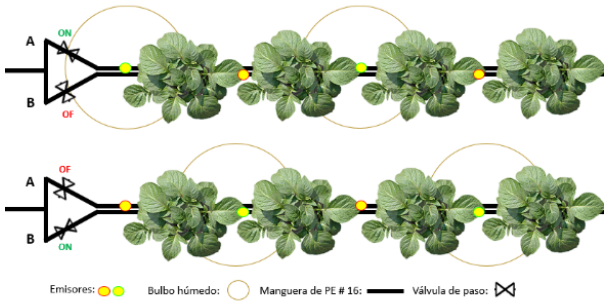


Figura 3: Vista de planta de la disposición lineal y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces

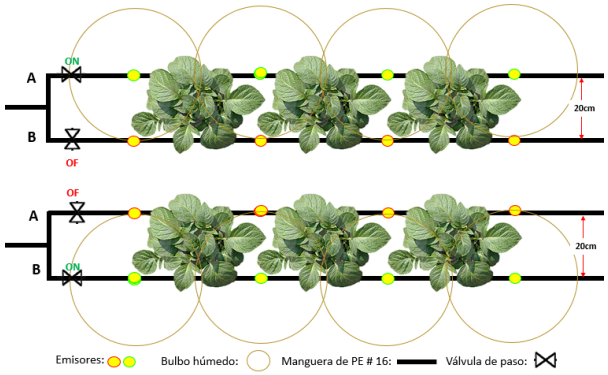


Figura 4: Vista de planta de la disposición en paralelo y la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces

2.6. *Evaluación de las variables del cultivo*

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo se evaluó el porcentaje de emergencia de las plantas a los 12 y 25 días después de la siembra. La altura de plantas se midió en 8 oportunidades (dos veces por etapa fenológica), así como el número de tallos principales por planta cuyas evaluaciones se realizaron antes y después del aporque, iniciándose a los 21 días después de la siembra. La cosecha se realizó de forma manual; se recogieron los tubérculos de cada planta, se clasificaron y pesaron. El rendimiento total se

considera como la relación entre la producción total y la superficie cosechada, expresada en kg/ha. El rendimiento comercial se considera como la relación entre la producción clasificada de acuerdo con los calibres pertenecientes al nivel comercial (extra, primera y segunda) y la superficie cosechada, expresada en kg/ha.

Asimismo, se contabilizó el número de tubérculos por calibre comercial, tomando como referencia la clasificación planteada por Sifuentes [34], agrupados en las cinco categorías que se muestran en la Tabla 3, de acuerdo con la longitud o diámetro del tubérculo.

Tabla 3: Descripción de calibres o diámetros de tubérculos de papa [33]

Categoría	Diámetro longitudinal (cm)
Extra	>9,0
Primera	7,5-9,0
Segunda	6,0 – 7,5
Tercera	4,5 – 6,0
Descarte	<4,5

3. Resultados y discusión

3.1. Cronograma de riegos y lámina aplicada para los diferentes tratamientos

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las aplicaciones de agua para los diferentes tratamientos considerados en la investigación.

En los tratamientos control (T-1 y T-2), se aseguró el 100 % de los requerimientos hídricos del cultivo aplicando una lámina total de riego de 161,5 mm (1615 m^3/ha). Para el caso del tratamiento de secado parcial de la zona de raíces (SPR1 y SPR2), la lámina total de riego fue de 129,1 mm, aplicando el 50 % de los requerimientos hídricos del cultivo en las etapas de emergencia y madurez. El procedimiento SPR se realizó en dos etapas, la primera, coincidente con el estado fenológico de crecimiento de la planta, a partir del día 20 (03/07/2017) hasta el día 29 después de la siembra (12/07/2017). La segunda aplicación se realizó entre los días 67 y 94 después de la siembra (desde el 28 de agosto hasta el 15 de octubre del 2017), coincidiendo con la etapa fenológica de maduración del producto. Los tratamientos SPR1 y SPR2 en ambas etapas, se realizaron con aplicaciones de agua al 50 % de la demanda hídrica del cultivo, con una lámina total de 129,1 mm (1291 m^3/ha), lo cual representa un ahorro del 20 %.

Tabla 4: Lámina de agua aplicada durante el experimento

Día después de la siembra	No. de riego	Fecha de riego	Lámina de agua aplicada por tratamiento (mm)			
			SPR1	T-1	SPR2	T-2
10	1	23/06/2017	2,7	2,7	2,7	2,7
13	2	26/06/2017	2	2	2	2
15	3	28/06/2017	2	2	2	2
18	4	01/07/2017	2	2	2	2
20	5	03/07/2017	0,7	1,4	0,7	1,4
22	6	05/07/2017	0,7	1,4	0,7	1,4
24	7	07/07/2017	0,7	1,4	0,7	1,4
27	8	10/07/2017	1	2	1	2
29	9	12/07/2017	1,4	2,7	1,4	2,7
32	10	15/07/2017	3	3	3	3
34	11	17/07/2017	6,8	6,8	6,8	6,8
37	12	20/07/2017	3	3	3	3
39	13	22/07/2017	3,1	3,1	3,1	3,1
41	14	24/07/2017	3,4	3,4	3,4	3,4
43	15	26/07/2017	2,7	2,7	2,7	2,7
45	16	28/07/2017	4.,5	4,5	4,5	4,5
49	17	01/08/2017	7,5	7,5	7,5	7,5
51	18	03/08/2017	6	6	6	6
53	19	05/08/2017	1,4	1,4	1,4	1,4
55	20	07/08/2017	1,4	1,4	1,4	1,4
57	21	09/08/2017	6,4	6,4	6,4	6,4
59	22	11/08/2017	1,4	1,4	1,4	1,4
62	23	14/08/2017	7,9	7,9	7,9	7,9
64	24	16/08/2017	6,7	6,7	6,7	6,7
66	25	18/08/2017	1,4	1,4	1,4	1,4
69	26	21/08/2017	7,6	7,6	7,6	7,6
71	27	23/08/2017	7,2	7,2	7,2	7,2
74	28	26/08/2017	6,4	6,4	6,4	6,4
76	29	28/08/2017	4,1	8,2	4,1	8,2
79	30	31/08/2017	3.,1	6,3	3,1	6,3
81	31	02/09/2017	2,2	4,5	2,2	4,5
83	32	04/09/2017	2,.7	5,5	2,7	5,5
85	33	06/09/2017	5,8	11,6	5,8	11,6
87	34	08/09/2017	1,5	3	1,5	3
90	35	11/09/2017	2,8	5,6	2,8	5,6
92	36	13/09/2017	2,5	4,9	2,5	4,9
94	37	15/09/2017	3,3	6,5	3,3	6,5
TOTAL			129,1	161,5	129,1	161,5

3.2. Porcentaje de emergencia y desarrollo de las plantas

En cuanto al nacimiento de plantas, la emergencia promedio después de 12 días de la siembra fue de 95 %; alcanzándose el 100 % a los 25

días posteriores a la siembra. No se observaron diferencias en la emergencia de planta entre los tratamientos; más bien pareciera que esta variable está más influenciada por las condiciones de calidad del tubérculo-semilla y del suelo que por los factores de humedecimiento consideradas en la investigación.

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos para alturas medias de planta tomadas en diferentes periodos del ciclo vegetativo. Durante los primeros 12 días después de la siembra el promedio de alturas no varió; posteriormente, la diferencia del crecimiento entre tratamientos fue mínima, indicando que no hay influencias significativas de los tratamientos de humedad sobre el desarrollo vegetativo del cultivo.

Tabla 5: Altura de planta registrada durante el desarrollo vegetativo para los tratamientos usados en la investigación

Días después de la siembra	Altura de la planta (cm)			
	Tratamiento			
	T-1	SPR1	SPR2	T-2
12	13	13	13	13
19	17	17	16	18
26	23	22	23	24
40	35	33	34	36
49	44	42	45	45
60	65	62	65	65
71	82	79	80	83
81	100	85	89	91
97	102	91	90	100
106	103	91	92	102

La planta alcanzó su altura máxima a los 106 días después de la siembra, con un valor de 103, 91, 92 y 102 cm para los tratamientos T-1, SPR1, SPR2 y T-2 respectivamente. Las diferencias en altura de planta no son significativas entre los diferentes tratamientos, indicando que la modalidad de humedecimiento no afecta al crecimiento; en cambio, se logra un ahorro de agua en cada riego.

3.3. Número de tallos principales por planta y área foliar

En la Tabla 6 se presenta el número de tallos por planta para cada tratamiento registrados a los 30 días (antes del aporque) y 106 días después de la siembra. Los valores dados en la tabla indican que el número medio de tallos disminuye con respecto al conteo inicial, debido a que, cuando la planta alcanza la madurez, las hojas inferiores se tornan amarillas y el follaje se cae [35]; sin embrago, las diferencias son insignificantes.

Tabla 6: Tallos por planta para cada tratamiento registrados a los 30 y 106 días después de la siembra

Tratamiento	Aporque (30 días)	Cosecha (106 días)
T-1	5,3	4,9
SPR1	5,1	4,3
SPR2	4,7	4,6
T-2	4,6	4,4

En lo que respecta al área foliar, en la Tabla 7 se presentan los porcentajes medios de cobertura del dosel medidos en 10 fechas de monitoreo con 10 repeticiones por fecha. Se observa que para el testigo se alcanzan valores de cobertura del dosel mayores que para los tratamientos; esto se debe a que el suministro de agua para el testigo fue hecho al 100 % del requerimiento evitando estrés hídrico en la planta.

Tabla 7: Cobertura promedio de dosel según la lámina de riego aplicada

Medición	Cobertura del dosel (%)	
Días después de la siembra	Tratamiento control	Tratamiento de riego parcial de la zona de raíces
13	0,7	0,6
18	3,9	3,6
29	21,8	18,3
34	31,7	26,8
43	60,6	56,1
46	69,4	66
52	81,6	79,2
59	91	83,3
74	83,6	81,4
95	72,1	76,4

3.4. Resultados del rendimiento obtenido para los diferentes tratamientos

En la Tabla 8, y en la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para el rendimiento total de

los diferentes tratamientos expresados en t/ha. El mayor rendimiento se obtuvo para el tratamiento T-2, con 66 t/ha, valor que se ubica en un 3 % más alto que para el tratamiento T-1, con 64 t/ha. Los rendimientos más bajos se obtuvieron en los tratamientos SPR1 y SPR2, con valores de 60 y 61 t/ha y una diferencia mínima entre ellos de 1,6 %.

Tabla 8: Rendimiento total para diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra

Tratamiento	Rendimiento total (t/ha)
T-1	64
SPR1	60
SPR2	61
T-2	66

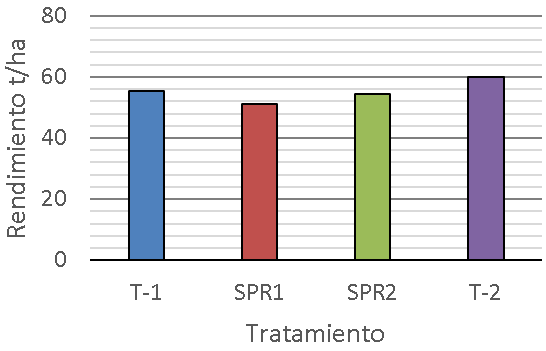


Figura 5: Rendimiento total para cada tratamiento en t/ha

3.5. Análisis de varianza (ANOVA) para los resultados del rendimiento

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos del análisis de varianza realizado para los valores del rendimiento total. Los valores dados en la tabla indican que los factores tipo de disposición de laterales y la interacción disposición del riego son significativos, y los efectos influyen sobre el rendimiento total. El tipo de riego es el que mayor incidencia tiene sobre el rendimiento total.

Los valores dados en la Tabla 9 muestran que existe un efecto de interacción estadísticamente significativa entre los niveles de los factores tipo de disposición de lateral (Disposición) y el tipo de riego (Riego), ya que el valor-p (0,486) es mayor que el correspondiente al nivel de significación de 95 % (0,05). Esto significa que combinando los niveles de los factores resultarían rendimientos totales iguales o similares que utilizando los niveles de los factores por separado.

Tabla 9: Análisis de varianza del rendimiento total por planta

Factor	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor de F	Probabilidad p
Disposición de laterales	0,282	0,28209	3,1521	0,07617
Tipos de riego	1,939	1,93887	21,665	0,00000374
Interacción Disposición de laterales: Tipo de riego	0,044	0,043552	0,4863	0,48575
Error	801,85	0,08949		

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la comparación de medias del rendimiento total obtenido en la investigación, según la "Prueba de Duncan".

Tabla 10: Comparación de medias para el rendimiento total según la Prueba de Duncan

Pares	Transformación	Ranking
Disposición 2:T	0,7723362	a
Disposición 1:T	0,7230201	a
Disposición 2:SPR	0,6655991	b
Disposición 1:SPR	0,6440993	b

Sobre la base del análisis estadístico dado en la Tabla 10, se deduce que no existe diferencia significativa entre los factores Disposición (1 y 2) y Tipo de riego (T y SPR); en cambio, la diferencia es estadísticamente significativa entre los casos de diferentes disposiciones y sus respectivos tratamientos (T-1 y SPR1, T-2 y SPR2). Si bien, los rendimientos totales son similares, existe diferencia en los rendimientos comerciales, indicando que,

de algún modo, el tipo de disposición y la aplicación del SPR influyen en el calibre de los tubérculos ocasionando una reducción del rendimiento comercial. En este estudio se han obtenido valores para el rendimiento total y el rendimiento comercial superiores a los 60 y 50 t/ha para los tratamientos T-1 , T-2, SPR1 y SPR2 respectivamente; estas cifras son más altas que las encontradas en estudios realizados en otras partes del mundo [17], [18], [19], [20], [36]. Los altos rendimientos se pueden atribuir a la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces en dos etapas fenológicas (crecimiento y madurez) y a la aplicación de los fertilizantes vía sistema de riego; los nutrientes y el agua tienen una estrecha relación, por lo que la aplicación de fertilizantes disueltos en el agua aumenta la eficiencia de asimilación de los mismos por el cultivo [37]. Los cultivos como la papa, sensibles a la sequía generalmente cierran sus estomas cuando están sometidos a estrés hídrico [25]; la transpiración puede ser inhibida por un secado alternativo, pero esto no necesariamente afecta la absorción de nutrientes de manera similar. Han y Kang [38] reportan que la eficiencia total de uso de N y P aumenta con la técnica de secado parcial de la raíz en comparación con la irrigación tradicional.

3.6. Rendimiento comercial

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para el rendimiento comercial de la papa para los diferentes tratamientos obtenida a los 110 días después de la siembra. La aplicación del riego deficitario es una técnica que permite el ahorro de agua, pero ocasiona una ligera reducción en el rendimiento comercial. En la disposición tipo 1 (T-1 y SPR1) la reducción del rendimiento comercial es del 7 %; en el de tipo 2 (T-2 y SPR2) se incrementa a 9 %.

Tanto el tipo de disposición de laterales de riego, como la aplicación del riego deficitario, influyeron directamente en el rendimiento. En la Figura 6 se muestra que entre los tratamientos que no recibieron riego deficitario, el que alcanza el mejor rendimiento comercial es el tratamiento de disposición de lateral tipo 2 (T-2), con un 8 % mayor que el tratamiento de disposición de lateral tipo 1 (T-1).

Tabla 11: Rendimiento comercial de las plantas con diferentes tratamientos a los 110 días después de la siembra

Tratamiento	Rendimiento comercial (t/ha)
T-1	55
SPR1	51
SPR2	54
T-2	60

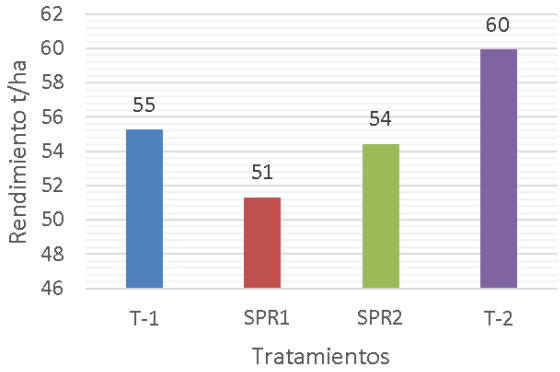


Figura 6: Rendimiento comercial para cada tratamiento en t/ha

3.7. Número de tubérculos comerciales y no comerciales

Para determinar la influencia del riego deficitario en la cantidad de tubérculos comerciales y no comerciales por planta se establecieron los siguientes grupos de clases:

- Tres tamaños comerciales: extra, primera y segunda.
- Dos tamaños pequeños: tercera y otros (<4.5cm).

En la Figura 7 se muestra en forma gráfica la distribución porcentual del número de tubérculos según el sistema de clasificación indicado. En la figura se observa que el tipo de disposición influye en el porcentaje de tubérculos de menor tamaño. Para los tratamientos SPR1 y T-1 el porcentaje

de tubérculos pequeños es mayor; mientras que para T-2 y SPR2 es mayor porcentaje de tubérculos grandes.

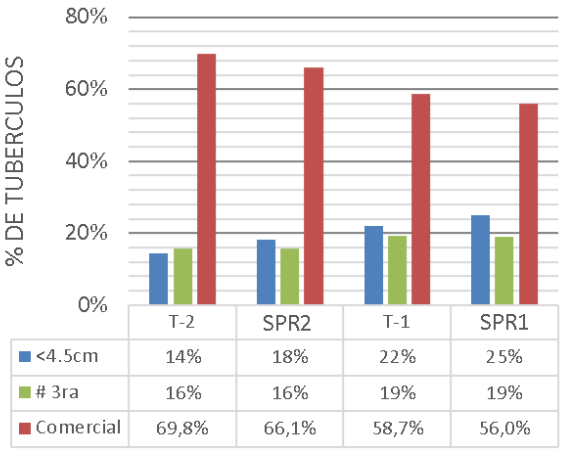


Figura 7: Distribución porcentual del número de tubérculos según su clasificación

3.8. *Análisis de varianza (ANOVA) del número de tubérculos comerciales*

En la Tabla 12 se presenta el análisis de varianza para el número de tubérculos comerciales. El factor disposición del riego es significativo; por lo tanto, estos factores contribuyen a explicar el número tubérculos comerciales (Tabla 12)

Tabla 12: Análisis de varianza del número de tubérculos comerciales por planta

Factor	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor de F	Probabilidad p
Disposición de laterales	0,182	0,1807	0,2021	0,0653
Tipos de riego	10,5	10,501	11,7459	0,000638
Interacción Disposición de laterales: Tipo de riego	0,44	0,0406	0,0459	0,831363
Error	801,07	0,08941		

En la Tabla 13 se presenta el análisis estadístico de comparación de medias del número de tubérculos comerciales, según la prueba de Duncan. La prueba muestra que no existe diferencia significativa entre los tratamientos y sus respectivos testigos (SPR1 y T-1, SPR2 y T-2); en cambio, las diferencias son estadísticamente significativas entre las disposiciones de laterales de riego utilizadas (T-1 y T-2, SPR1 y SPR2). El mayor número de tubérculos comerciales provienen de los tratamientos SPR1 y T-1, con un promedio de 10,06 y 10,68 tubérculos por planta. El menor número de tubérculos por planta corresponden a los tratamientos SPR2 y T-2, con valores de 10,07 y 10,77 respectivamente.

Tabla 13: Comparación de medias, según prueba de Duncan, número de tubérculos comerciales

Pares	Transformación	Ranking
Disposición 2:T	4,507008	a
Disposición 1:T	4,465243	a
Disposición 2:SPR	4,27754	b
Disposición 1:SPR	4,262631	b

3.9. *Análisis de varianza (ANOVA) del número de tubérculos no comerciales*

Del mismo modo que para el caso de los tubérculos comerciales, se llevó a cabo el análisis de varianza del número de tubérculos no comerciales. Los resultados se presentan en la Tabla 14, la cual muestra que solamente el factor tipo de disposición es significativo; es decir, que solo ese factor contribuye a explicar el número tubérculos no comerciales.

En la Tabla 15 se presenta el análisis estadístico de Duncan de comparación de medias del número de tubérculos no comerciales. Los resultados muestran que no existe diferencia significativa entre los tratamientos y sus respectivos testigos (SPR1 y T-1, SPR2 y T-2); en cambio, las diferencia son estadísticamente significativas entre las diferentes disposiciones de laterales de riego (T-1 y T-2, SPR1 y SPR2). El mayor número de tubérculos no comerciales se presentaron en los tratamientos SPR1 y T-1, con valores medios de 7,52 y 7,90 tubérculos por planta, respectivamente. El menor

Tabla 14: Análisis de varianza del número de tubérculos no comerciales por planta

Factor	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor de F	Probabilidad p
Disposición de laterales	187,01	187,013	62,8254	0
Tipos de riego	0,61	0,613	0,2058	0,65
Interacción Disposición de laterales: Tipo de riego	0,44	0,0406	0,0459	0,82513
Error	801,07	0,08941		

número de tubérculos por planta, ocurre en los tratamientos SPR2 y T-2, con valores de 5,17 y 4,66 respectivamente.

Tabla 15: Comparación de medias del número de tubérculos no comerciales según la prueba de Duncan

Pares	Transformación	Ranking
Disposición 1:SPR	2,740371	a
Disposición 1:T	2,713613	a
Disposición 2:SPR	1,854105	b
Disposición 2:T	1,776508	b

3.10. Tamaño de tubérculos

Con la finalidad de determinar la influencia del riego deficitario en el calibre de los tubérculos, se agruparon los tubérculos según el sistema de clasificación establecido Los resultados se presentan en la Figura 8. De acuerdo con las tendencias que muestra la figura, pareciera que existen efectos de los tratamientos usados en la investigación sobre el calibre de los tubérculos. De un lado, se observa una disminución en el tamaño de los tubérculos ocasionada por la disposición de laterales (T-1 y T-2), lo mismo que por la aplicación del riego deficitario con secado parcial de raíces (SPR1 y SPR2), conduciendo a una disminución sustancial en los rendimientos. La mayor cantidad de tubérculos del calibre tipo "extra" corresponde a la disposición tipo 1 (SPR1 y T-1); el calibre tipo "primera" se encuentra coincidentemente en los cuatro tratamientos; la ocurrencia de los calibres tipo "segunda", "tercera" y "menores" de 4,5 cm, corresponden preponderantemente a la disposición de tipo 1 en comparación con la disposición de tipo 2. Se puede concluir que tanto la disposición y la aplicación de SPR ejercen influencia sobre el calibre de los tubérculos.

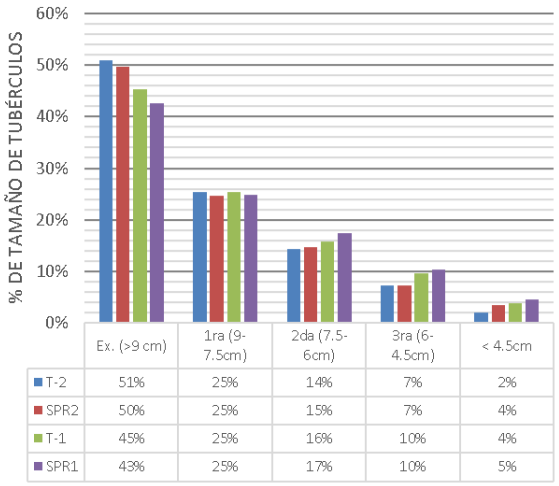


Figura 8: Efecto de los tratamientos sobre el tamaño de tubérculos según el sistema de clasificación establecido

En la Tabla 16 se presentan los resultados de la prueba de comparación de medias del rendimiento por calibres de tubérculos por planta del cultivo de papa, sometidos a cuatro tratamientos, según la prueba de Tukey.

En la Tabla 16 se observa que, para la clasificación tipo extra existe diferencia significativa; los mejores resultados corresponden al tratamiento T-2 y los más bajos, a SPR1. Para la clasificación primera (1era), no hay significancia estadística entre los cuatro tratamientos, siendo los resultados muy parecidos; para los otros rangos de clasificación la diferencia es significativa. En el caso de la segunda (2da), los tratamientos T-1 y SPR1 arrojan mejores resultados, y los más bajos, corresponden a los tratamientos T-2 y SPR2. Para el caso de la clasificación tercera (3era), los tratamientos T-1 y SPR1 arrojan valores similares

Tabla 16: Comparación de medias del rendimiento por calibres de tubérculos por planta del cultivo de papa, según la prueba de Tukey

Trata miento	Extra	1^{era}	2^{da}	3^{era}	<4,5 cm
T-2	1,01008 ^{a}	0,50306 ^{a}	0,28715 ^{ab}	0,14457 ^{b}	0,042444 ^{b}
SPR2	0,91155 ^{ab}	0,45413 ^{a}	0,26880 ^{b}	0,1355556 ^{b}	0,065955 ^{a}
T-1	0,86946 ^{bc}	0,48795 ^{a}	0,30235 ^{ab}	0,18666 ^{a}	0,073955 ^{a}
SPR1	0,77231 ^{c}	0,45195 ^{a}	0,31577 ^{a}	0,18813 ^{a}	0,085111 ^{a}
	S	NS	S	S	S

S: significativo; NS: No significativo.

y más altos; mientras que los resultados más bajos y también similares fueron T-2 y SPR2. Para la clasificación de tubérculos menores que 4,5 cm de longitud, existe diferencia estadística significativa; la de menor valor corresponde al tratamiento T-2; para el resto de calibre, hay similitud entre las medias. En los tratamientos de SPR no se detectaron diferencias significativas en el rendimiento de tubérculos en comparación con los tratamientos de T-1 y T-2. El riego parcial de la zona de raíces puede favorecer la temperatura del suelo y la absorción de agua, evitando una reducción significativa del rendimiento del cultivo [22]. Los resultados de esta investigación concuerdan con aquellos de estudios que probaron el riego SPR [39], [23], [20], [19], [24] y el riego deficitario [40], [39] en los que el rendimiento de la papa no se redujo significativamente cuando se utilizó solo el 50 % del agua requerida en SPR1 y SPR2 en comparación a T-1 y T-2.

3.11. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso o productividad del agua, se expresa como la producción de papa obtenida por cada metro cúbico de agua utilizada en el cultivo y se expresa en kg/m^3. En la Tabla 17 se presentan los resultados del rendimiento obtenido en el cultivo, los consumos de agua y la eficiencia o productividad del uso del agua, diferenciados por el tipo de tratamiento.

En la cuarta columna de la Tabla 17 se observa que los valores más altos de la eficiencia de uso del agua corresponden a los tratamientos del secado parcial de raíces con magnitudes de 46,48 kg/m^3 y 47,25 kg/m^3. Esta mayor eficiencia de uso del agua se debe a la menor lámina de aplicación; en contraposición, los valores más bajos corresponden al tratamiento control y las disposiciones de los laterales de riego 1 y 2 con 38,76 kg/m^3 y 39,98 kg/m^3 respectivamente. Resultados referenciales extraídos de varios estudios indican que la eficiencia de uso del agua en el cultivo de papa varía entre 9 y 25 kg/m^3 en diferentes climas [41], [42], [43], [24], [25], [44], [45]. Sánchez y Meza [46], en un estudio experimental desarrollado en la misma área de la presente investigación sobre evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación del riego deficitario (SPR) utilizando cintas de riego, encontraron valores de eficiencia de uso de agua de 26,65 kg/m^3 y 21,55 kg/m^3, para los tratamientos SPR y bajo riego por goteo al 100 % de ETc. respectivamente. Estos resultados indican que la eficiencia de uso del agua con la alternativa de diseño propuesta en la presente investigación ha mejorado significativamente, incrementándose en un 23,7 %, bajo el marco del sistema de SPR (50 % de Etc), en comparación con los casos de riego por goteo al 100 % Etc.

Tabla 17: Rendimiento del cultivo, consumo y eficiencia de uso del agua

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Consumo de agua (m^3/ha)	Eficiencia de uso del agua (kg/m^3)
T-1	64000	1651	38,76
SPR1	60000	1291	46,48
SPR2	61000	1291	47,25
T-2	66000	1651	39,98

4. Conclusiones

El uso del método de riego por goteo con dos disposiciones de los laterales de riego para la aplicación de la técnica SPR, complementado con fertirrigación, permitió incrementar significativamente el rendimiento, tanto en condiciones de riego al 100 % de ETc como en el secado parcial de la zona de raíces SPR. Con esta tecnología se logró un incremento de aproximadamente 33 % en el rendimiento comercial, y la obtención de una producción total superior a 60 t/ha y un rendimiento comercial de más de 50 t/ha, en comparación con las 40 t/ha del rendimiento promedio obtenido por Sánchez [46] y Nuñes [47] con la variedad UNICA en la misma zona de estudio. El riego deficitario con secado parcial de la zona de raíces, aplicado en las dos etapas fenológicas, crecimiento y madurez, redujo de forma notable el tamaño de los tubérculos; se encontró significancia estadística en el número de tubérculos comerciales por planta; el efecto significativo en tubérculos no comerciales se dio por el tipo de disposición de laterales de riego.

El rendimiento obtenido en la investigación cuadruplica al rendimiento nacional de unas 15 t/ha de papa y permite un ahorro de agua de más del 30 %. Esta consideración hace viable el uso del método a gran escala en áreas con escasez de agua porque el alto rendimiento compensaría el costo que requiere el sistema tecnificado de riego. Es probable que éste sea el mayor aporte a la gestión del agua en el Perú.

5. Referencias

[1] Ministerio de Agricultura y Riego, *Papa: Características de la Producción Nacional y de la Comercialización en Lima Metropolitana*, Dirección General de Políticas Agrarias. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria Std., 2017.

[2] A. R. Sepaskhah and S. H. Ahmadi, "A Review on Partial Root-Zone Drying Irrigation," *International Journal of Plant Production*, vol. 4, no. 4, pp. 1735–6814, 2010.

[3] D. W. Grimes, V. T. Walhood, and W. L. Dickens, "Alternate-furrow irrigation for San Joaquin valley cotton," *California Agriculture*, vol. 22, no. 5, pp. 4–6, 1968.

[4] A. Samadi and A. R. Sepaskhah, "Effects of alternate furrow irrigation on yield and water use efficiency of dry beans," *Iran Agricultural Research*, vol. 3, pp. 95–115, 1984.

[5] A. R. Sepaskhah and S. A. Sichani, "Evaluation of subsurface irrigation spacings for bean production," *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 23–26, 1996.

[6] A. R. Sepaskhah and A. A. Kamgar-Haghighi, "Water use and yields of sugarbeet grown under every-otherfurrow irrigation with different irrigation intervals," *Agricultural Water Management*, vol. 34, no. 1, pp. 71–79, 1997.

[7] P. E. Kriedmann and I. Goodwin, "Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying," in *Irrigation insights no. 4*. Canberra: Land and Water Australia, 2003.

[8] B. R. Loveys, M. Stoll, P. R. Dry, and M. G. McCarthy, "Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops," *Acta Horticulturae*, vol. 537, pp. 187–197, 2000.

[9] S. Z. Kang and J. H. Zhang, "Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency," *Journal of experimental botany*, vol. 55, no. 407, pp. 2437–2446, 2004.

[10] C. Gençoğlan, H. Altunbey, and S. Gençoğlan, "Response of green bean (*P. vulgaris L.*) to subsurface drip irrigation and partial rootzone-drying irrigation," *Agricultural Water Management*, vol. 84, no. 3, pp. 274–280, 2006.

[11] B. G. Leib, H. W. Caspari, C. A. Redulla, P. K. Andrews, and J. Jabro, "Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate," *Irrigation Science*, 2006.

[12] Y. Wang, F. Liu, L. S. Jensen, A. De Neergaard, and C. R. Jensen, "Alternate partial root-zone irrigation improves fertilizer-N use efficiency in tomatoes," *Irrigation Science*, vol. 31, pp. 589–598, 2013.

[13] J. Zegbe, M. Behboudian, and B. Clothier, "Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes," *Agricultural Water Management*, vol. 68, no. 3, pp. 195–206, 2004.

[14] D. Zhang and P. Guo, "Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis," *Agricultural Water Management*, vol. 170, no. 1, pp. 5–19, 2016.

[15] M. M. Giuliani, G. Gatta, E. Nardella, and E. Tarantino, "Water saving strategies assessment on processing tomato cultivated in Mediterranean region," *Italian Journal of Agronomy*, vol. 11, no. 1, pp. 69–76, 2016.

[16] J. H. Qin, Y. J. Chen, C. Y. Zhou, B. P. Pang, and M. L. Meng, "Effects of frequency of drip irrigation frequency under mulch on potato growth, yield and water use efficiency," *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, vol. 21, no. 7, pp. 824–830, 2013.

[17] K. K. Sarker, A. Hossain, J. Timsina, S. J. Biswas, B. C. Kundu, A. Barman, K. F. Ibn Murad, and F. Akter, "Yield and quality of potato tuber and its water productivity are influenced by alternate furrow irrigation in a raised bed system," *Agricultural Water Management*, vol. 224, no. 2019, p. 105750, 2019.

[18] J. Qin, D. A. Ramírez, and K. Xie, "Is Partial Root-Zone Drying More Appropriate than Drip Irrigation to Save Water in China? A Preliminary Comparative Analysis for Potato Cultivation," *Potato Research*, vol. 61, pp. 391–406, 2018.

[19] W. Yactayo, D. A. Ramírez, T. German, A. Worku, A. Abeb, D. Harahagazwe, V. Mares, F. De Mendiburu, and R. Quiroz, "Improving potato cultivation using siphons for partial root-zone drying irrigation: a case study in the Blue Nile river basin, Ethiopia," *Open Agriculture*, vol. 2, no. 1, pp. 255–259, 2017.

[20] W. Yactayo, D. A. Ramírez, R. Gutiérrez, V. Mares, A. Posadas, and R. Quiroz, "Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency," *Agricultural Water Management*, vol. 123, pp. 65–70, 2013.

[21] R. E. Abdelraouf, "Effect of partial root zone drying and deficit irrigation techniques for saving water and improving productivity of potato," *International Journal of ChemTech Research*, vol. 9, no. 8, pp. 170–177, 2016.

[22] F. Karandish and A. Shahnazari, "Soil temperature and maize nitrogen uptake improvement under partial root-zone drying irrigation," *Pedosphere*, vol. 26, no. 6, pp. 872–886, 2016.

[23] K. Y. Xie, X. X. Wang, R. F. Zhang, X. F. Gong, S. B. Zhang, V. Mares, C. Gavilán, A. Posadas, and R. Quiroz, "Partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China," *Scientia Horticulturae*, vol. 134, pp. 20–25, 2012.

[24] Z. Jovanovic, R. Stikic, B. Vucelic-Radovic, M. Paukovic, Z. Brocic, G. Matovic, S. Rovcanin, and M. Mojevic, "Partial root-zone drying increases WUE, N and antioxidant content in field potatoes," *European Journal of Agronomy*, vol. 33, no. 2, pp. 124–131, 2010.

[25] S. H. Ahmadi, M. N. Andersen, F. Plauborg, R. T. Poulsen, C. R. Jensen, A. R. Sepaskhah, and S. Hansen, "Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity," *Agricultural Water Management*, vol. 97, no. 2010, pp. 1923–1930, 2010.

[26] M. Shayannejad and A. Moharreri, "Effect of every—Other furrow irrigation on water use efficiency, starch and protein contents of potato," *Agriculture Science*, vol. 1, no. 2, pp. 107–112, 2009.

[27] H. Saeed, I. G. Grove, P. S. Kettlewell, and N. W. Hall, "Potential of partial root zone drying as an alternative irrigation technique for potatoes (*Solanum tuberosum*)," *Annals of Applied Biology*, vol. 152, no. 1, pp. 71–80, 2008.

[28] A. Shahnazari, F. Liu, M. N. Andersen, S. E. Jacobsen, and C. R. Jensen, "Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions," *Field Crops Research*, vol. 100, no. 1, pp. 117–124, 2007.

[29] F. L. Liu, A. Shahnazari, M. N. Andersen, S. E. Jacobsen, and C. R. Jensen, "Physiological responses of potato (Solanum tuberosum L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency," *Journal of Experimental Botany*, vol. 57, no. 14, pp. 3727–3735, 2006.

[30] F. L. Liu, A. Shahnazari, M. N. Andersen, S. E. Jacobsen, and C. R. Jensen, "Effects of deficit irrigation (DI) and partial root drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato," *Scientia Horticulturae*, vol. 109, no. 2, pp. 113–117, 2006.

[31] P. Monneveux, D. A. Ramírez, and M. T. Pino, "Drought tolerance in potato (S. tuberosum L.). Can we learn from drought tolerance research in cereals?" *Plant Science*, vol. 205-206, pp. 76–86, 2013.

[32] H. L. Xu, F. F. Qin, Q. C. Xu, J. Y. Tan, and G. M. Liu, "Applications of xerophytophysiology in plant production: potato cultivation improved by partially drying the root zone of the early season but not the entire season," *Scientia Horticulturae*, vol. 129, no. 4, pp. 528–534, 2011.

[33] Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA), *Aplicación de un riego eficiente en un sistema de riego por goteo. Gobierno Regional de Arequipa*, Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA) Std., 2015.

[34] F. Sifuentes, "Crecimiento, producción y calidad de papa para fritura var. UNICA," Tesis Ing. Agr., Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2012.

[35] R. P. Egúsquiza-Bayona, *La papa en el Perú*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014.

[36] S. Foti, G. Mauromicale, and A. Ierna, "Influence of irrigation regimes on growth and yield of potato cv. *Spunta*," *Potato Research*, vol. 38, pp. 307–318, 1995.

[37] M. Farooq, A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita, and S. M. A. Basra, "Plant drought stress: effects, mechanisms and management," *Sustainable Agriculture*, vol. 29, no. 1, pp. 185–212, 2009.

[38] Y. L. Han and S. Z. Kang, "Effects of controlled partial root-zone irrigation on root nutrition uptake of maize (*Zea mays L.*)," *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineer*, vol. 18, pp. 57–59, 2002.

[39] H. Wang, F. L. Liu, M. N. Andersen, and C. R. Jensen, "Comparative effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen uptake in potatoes (*Solanum tuberosum L.*)," *Irrigation Science*, vol. 27, no. 6, pp. 443–448, 2009.

[40] T. Erdem, A. H. Orta, Y. Erdem, and H. Okursoy, "Crop water stress index for potato under furrow and drip

irrigation systems," *Potato Research*, vol. 48, no. 1–2, pp. 49–58, 2005.

[41] A. Ierna and G. Mauromicale, "Potato growth, yield and water productivity response to different irrigation and fertilization regimes," *Agricultural Water Management*, vol. 201, pp. 21–26, 2018.

[42] K. K. Sarker, M. A. R. Akanda, S. K. Biswas, D. K. Roy, A. Khatun, and M. A. Goffar, "Field performance of alternate wetting and drying furrow irrigation on tomato crop growth, yield, water use efficiency, quality and profitability," *Journal of Integrative. Agriculture*, vol. 15, no. 10, pp. 2380–2392, 2016.

[43] M. A. Badr, W. A. El-Tohamy, and A. M. Zaghloul, "Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region," *Agricultural Water Management*, vol. 110, pp. 9–15, 2012.

[44] T. M. Darwish, T. W. Atallah, S. Hajhasan, and A. Haidar, "Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato," *Agricultural Water Management*, vol. 85, pp. 95–104, 2006.

[45] B. Z. Yuan, S. Nishiyama, and Y. Kang, "Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip irrigated potato," *Agricultural. Water Management*, vol. 63, pp. 157–167, 2003.

[46] M. Sánchez y R. Meza, "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación del riego deficitario (PRD) utilizando cintas de riego," *Anales Científicos*, vol. 76, no. 1, pp. 22–28, 2014.

[47] P. Núñez-Vargas, "Fuentes y dosis de fertilización potásica en el crecimiento, tuberización y calidad de fritura de la papa (*Solanum tuberosum L.*) variedad UNICA," Tesis Ing. Agr., Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2016.

Phenol degradation and HPLC identification of products generated using red mud as a catalyst in solar advanced oxidation processes

Guillermo Centeno-Bordones *,[a], Leidy Pernía [b], Ygmar Jiménez[a,†], José V. García[b]

[a]*Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*

[b]*Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (PDVSA-Intevep). Los Teques, Venezuela.*

Abstract.- The work is based on the degradation of phenol using red mud as a catalyst for solar advanced oxidation processes (AOP). A factorial experiment design 2^3 was applied with two points at the center; the COD measurement was performed using the HACH DR2010 method and the phenol concentration by the 4-aminoantipyrine method. AOP achieved degradations in the COD of 94,1 % and of the phenol concentration of 99,7 %. Secondary standards were analyzed for HPLC, where the spectral coincidence of the compounds was guaranteed by mass coupled gas chromatography (CG-MS). The identification of the species of the phenol degradation was performed through High Performance Liquid Chromatography (HPLC) coupled to a UV-HP DAD detector. The optimal separation of the studied standards was with a mobile phase: water / methanol (7:3), pH 4,0 adjusted with 0,1 M H_3PO_4, with a flow of 0,5 mL/min, λ = 220 nm. After the separation conditions were obtained, the samples were identified as degradation products oxalic, formic, acetic acid and hydroquinone. Demonstrating that the red mud was appropriate to decrease the COD and phenol concentration by means of solar AOP.

Keywords: red mud; advanced oxidation processes; GC-MS; HPLC; CDO.

Degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar

Resumen.- El trabajo está basado en la degradación de fenol utilizando lodo rojo como un catalizador para procesos de oxidación avanzada solar (POA). Se aplicó un diseño de experimento factorial 2^3 con dos puntos al centro, la medición de la DQO se realizó mediante el Método HACH DR2010 y la concentración de fenol por el método 4-aminoantipirina. POA alcanzó degradaciones en la DQO del 94,1 % y de la concentración de fenol del 99,7 %. Se analizaron patrones secundarios para el HPLC, donde se garantizó la coincidencia espectral de los compuestos mediante una cromatografía de gases acoplada a masas (CG-MS). La identificación de las especies de la degradación de fenol se realizó a través de la Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) acoplado a un detector UV-HP DAD. La separación óptima de los patrones estudiados, fue con una fase móvil: agua/metanol (7:3), pH 4,0 ajustado con H_3PO_4 0,1 M, con un de flujo 0,5 mL/min, λ = 220 nm. Luego de obtenidas las condiciones de separación se identificaron en las muestras como productos de la degradación ácido oxálico, fórmico, acético e hidroquinona. Demostrando que el lodo rojo resultó apropiado para disminuir la concentración de la DQO y fenol mediante POA solar.

Palabras clave: lodo rojo; procesos de oxidación avanzada; GC-MS; HPLC; DQO.

Recibido: 15 de abril, 2020.
Aceptado: 25 de mayo, 2020.

1. Introducción

El fenol es uno de los contaminantes ambientales más peligrosos y frecuentes en aguas residuales de las industrias químicas, petroquímicas, agroalimentarias y farmacéuticas, debido a su elevada toxicidad, bioacumulación, poca biodegradabilidad y a su carácter cancerígeno [1, 2, 3]. El fenol y sus derivados son considerados como residuos peligrosos debido a que son clasificados como compuestos orgánicos persistentes (COP) en aguas, donde los tratamientos biológicos proporcionados al agua residual (de mayor uso doméstico e

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*gcenteno1@uc.edu.ve (G. Centeno-Bordones)

industrial) no han mostrado ser efectivos al momento de la remoción, ya que los efluentes con estas características exhiben altos valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) [4].

Para la degradación de estos COP se han utilizado diferentes métodos de tratamiento terciarios de aguas, tales como la nanofiltración, microfiltración, electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada con hierro y lámparas UV, así como tratamientos combinados de fotocatálisis (TiO_2) y oxidación electrolítica [5]. La aplicación de algunas de estas tecnologías ha resultado en la exitosa disminución de la concentración de fenol y sus derivados en los efluentes tratados. A pesar de los buenos resultados obtenidos al utilizar estas metodologías, se han determinado algunos inconvenientes en las mismas, por ejemplo, la utilización de catalizadores genera altos costos e inconvenientes de manejo, las técnicas de radiación artificial (lámparas UV) incrementan los costos motivado a la tecnología que requiere el montaje de éste tipo de plantas.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son una alternativa probada para el tratamiento de efluentes contaminados con fenol y sus derivados. Los POA pueden definirse como procesos de oxidación basados en la acción de especies altamente reactivas (radicales hidroxilos, •OH) que conducen a la degradación y mineralización de los compuestos contaminantes y a la inhibición de organismos patógenos [5, 6]. Los radicales al ser especies oxidantes energéticos, son capaces de oxidar compuestos orgánicos por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica al doble enlace, generándose radicales orgánicos libres (ecuaciones (1) y (2)).

$$\bullet OH + RH \longrightarrow \bullet R + H_2O \quad (1)$$

$$\bullet R + O_2 \longrightarrow \bullet RO_2 \longrightarrow CO_2 + \text{Productos} \quad (2)$$

Los lodos rojos tratados como catalizador en los POA, llevan a cabo dos técnicas de oxidación combinadas, como es el FotoFenton-like debido al contenido de hierro (Fe^{3+}) y la fotocatálisis por la presencia de titanio (Ti) en los lodos rojos [7]. El proceso Foto-Fenton es una técnica particular de los POA, debido a que utilizan peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para la formación de radicales libres en presencia de iones ferrosos (Fe^{2+}), los cuales se oxidan a iones férricos (Fe^{3+}) (ecuación (3)), en presencia de luz (hv). Al mismo tiempo la técnica FotoFenton-like utiliza la fotoreducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} formando un acuocomplejo metal-carga-ligando (ecuación (4)) [7, 8, 9].

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{3+} + \bullet HO + OH^- \quad (3)$$

$$Fe^{3+} + H_2O + hv \longrightarrow Fe^{2+} + \bullet HO + H^+ \quad (4)$$

Por otra parte la fotocatálisis hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz ultravioleta por parte de un catalizador, en específico el TiO_2 realiza una óxido-reducción generando un par e^- hueco y la consecutiva formación de radicales oxhidrilo y superóxido [10, 11, 12, 13, 14, 15].

Algunos investigadores tienen como propósito mejorar las potencialidades catalíticas del lodo rojo, con el fin de reducir controladamente los residuos del mismo, para producir sistemas activos con aplicaciones medioambientales [16], lograron producir sistemas de lodos rojos activos para aplicaciones ambientales diferentes, como son, oxidación avanzada mediante la reacción de Fenton heterogénea y la reducción de Cr (VI) en medio acuoso. La caracterización del catalizador mostró que a diferentes temperaturas de calcinación entre 300 y 600 °C, el H_2 reduce el lodo rojo a diferentes fases, principalmente Fe_3O_4, FeO / Fe_3O_4 y FeO, siendo estas fases activas catalíticamente. La reducción con H_2 a 400 °C mostró los mejores resultados para la oxidación del colorante azul de metileno como molécula modelo con condiciones de reacción con un H_2O_2 a pH neutro debido a la presencia del compuesto Fe^0 / Fe^{+3} o Fe^{+4}. Logrando por último regenerar el catalizador, para cerrar el ciclo ambiental. En éste orden de ideas es importante señalar que los lodos rojos, también han tenido aplicaciones

como catalizadores heterogéneos en los procesos de oxidación avanzada tipo fotoquímico como el foto Fenton-like utilizando lámpara UV de mercurio de 400W como fuente de radiación. Según la investigación desarrollada por Galvickova y colaboradores [17] el lodo rojo puede convertirse en un eficiente catalizador para la eliminación de fenol en agua obteniendo resultados altamente eficaces. De igual manera se utilizó éste material activado por calcinación para la degradación fotocatalítica de Bisfenol A, obteniendo resultados de degradación entre 88 y 100 % utilizando una lámpara UV de 16W. Los estudios demuestran como la activación del lodo rojo mediante la calcinación y la neutralización con ácido, puede mejorar sus propiedades fisicoquímicas y también potenciar sus propiedades fotocatalíticas con el fin de incrementar su actividad en la fotodegradación de especies químicas contaminantes [18], evidenciándose un incremento del área superficial en un factor de 30 mediante la adición de HCl y un secado a 110 °C. Logrando una descomposición del Naranja de metilo mediante una lámpara UV en un 92,4 %. Evidenciando el uso reciente del lodo rojo como fotocatalizador heterogéneo de bajo costo en los procesos de oxidación avanzada.

Debido a la cantidad de variables que afectan las fotoreacciones durante el POA para el tratamiento de efluentes fenólicos, el diseño de experimentos (DDE) se emplea como una herramienta metodológica y estadística, que permite visualizar las posibles interacciones entre las variables estudiadas, verificando las correlaciones entre los parámetros analizados [19, 20, 21]. El presente estudio tiene como objetivo la identificación por HPLC de los productos generados de la fotodegradación del fenol mediante procesos de oxidación avanzados solar utilizando lodos rojos como catalizador.

2. Metodología

La investigación se desarrolló a través de un diseño de experimento tipo factorial 2^3 con dos puntos al centro teniendo como factores de entrada:

a) Cantidad de catalizador,

b) Cantidad de peróxido y

c) pH ajustado

y como variable de respuesta: la DQO, como se observa en la Tabla 1. La reacción de oxidación avanzada solar se llevó a cabo en un balón de tres bocas de volumen 250 mL (vidrio borosilicato), siguiendo la metodología propuesta por Ramos y colaboradores [22], Yamal y colaboradores [23]. Al reactor bach se le agregó un volumen de 100 mL de fenol (Riedel de Haen) con una concentración de 2000 ppm, luego se le añadió el catalizador LRS400 siendo lodo rojo (CVG-Bauxilim) neutralizado con salmuera de ósmosis inversa mejorada con cloruro de magnesio (Sigma-Aldrich y calcinado a 400 °C), a éste slurry se le ajustó el pH con ácido sulfúrico (Sigma-Aldrich) midiéndolo con un pHmetro digital Orión 330 Thermo, seguidamente al balón de reacción se le conectó un embudo de adición para la dosificación de peróxido de hidrógeno al 30 % (grado analítico marca Eka Nobel), además de un tubo de enfriamiento para el control de vapores generados y un termómetro (Fisherbrand) para el seguimiento de la temperatura de reacción, manteniendo una agitación constante a través de un agitador magnético (SLHS-SI Analytics) de acuerdo con el montaje experimental mostrado en la Figura 1.

Tabla 1: Factores, niveles y codificación del diseño de experimento factorial 2^3 con dos puntos al centro

Factores	Niveles	Codificación
(A) Cantidad	2	(-1)
de Lodo rojo	4	(0)
salmuera (LRS400)	6	(1)
(g/L)		
(B) Peróxido	27	(-1)
de Hidrógeno	40	(0)
(g/L)	53	(1)
	2	(-1)
(C) Ajuste de pH	3	(0)
	4	(1)

Variable de respuesta: Demanda Química de Oxígeno (DQO).

El tiempo de la reacción a la exposición solar se evaluó a 4h, en éste intervalo de



Figura 1: Montaje experimental del reactor para el proceso de oxidación avanzada

tiempo se garantizó el cenit solar, la medición de la radiación solar (Wh/m^2) se llevó a cabo mediante un piromanometro ISO First Class marca Climatronics Corporation, en las siguientes coordenadas Norte 10°22'03,16" y Este 67°02'38,25" a 1316 msnm, Los Teques, Estado Miranda-Venezuela.

Con las condiciones del mejor resultado obtenido en el diseño de experimento se desarrollaron los blancos del proceso de oxidación avanzada solar iniciando con la aplicación de un proceso Fenton-like, peroxidación con radiación solar (peroxidación/UV solar), fotolisis solar del fenol (fenol/ UV solar) y la aplicación del catalizador y radiación solar para medir su efecto en el fenol (fenol/CAT/UV solar).

Al finalizar la reacción se procedió a filtrar (filtro de papel Whatman) para separar las fases, envasando el líquido resultante en un vial ámbar en refrigeración con ausencia de luz, para finalmente determinar la DQO según el Método HACH DR2010, mientras la concentración de fenol se determinó por el método 4-aminoantipirina del Standard Methods 5530D (Modificada).

Se determinó el porcentaje de remoción o disminución de la DQO, mediante la ecuación (5):

$$\%\text{Reducción de DQO} = \frac{DQO_o - DQO_f}{DQO_o} \cdot 100 \quad (5)$$

Donde la DQO_o es la DQO antes del proceso fotoquímico (mg O_2/L) y la DQO_f es el valor después del proceso. Los datos experimentales fueron analizados con el programa estadístico Statgraphic Centurion XVI, versión libre [24]. De la misma manera se determinó la disminución de la concentración de fenol en la reacción fotoquímica, así como para los blancos de la reacción mediante la ecuación (6):

$$\%\text{Reducción de Fenol} = \frac{Fenol_{(i)} - Fenol_{(f)}}{Fenol_{(i)}} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde el $Fenol_{(i)}$ es la concentración inicial del proceso de reacción y el $Fenol_{(f)}$ es el valor final de la fotoreacción. Para este análisis se realizó una curva de calibración del fenol mediante un espectrofotómetro HACH DR2010, aplicando la ley de Lambert-Beer.

La identificación de las especies de la degradación del fenol re realizó a través de la técnica de Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) acoplado a un detector UV-HP DAD, en un equipo marca Aligent Technologies serie 1200 con una columna C-18, 4,5mm, 3,5 µm, la fase móvil fue agua: metanol (Merk) en una proporción de 7:3 acidificada con ácido fosfórico (Scharlau AC 1100) hasta alcanzar un pH 4. Con el fin de garantizar la coincidencia espectral de los patrones secundarios utilizados en HPLC se empleó una cromatografía de gases acoplada a masas (CG-MS) bajo el método ASTM D5790-95 (2012) ensayo normalizado para medidas de compuestos orgánicos purgables en agua por columna capilar de cromatografía de gases/espectrometría de masa [25], se empleó un cromatógrafo de gases marca Agilent Technologies modelo 6890N acoplado a detector selectivo de

masas Agilent Technologies 5973. Las especies de degradación del fenol que se utilizaron como patrón secundario fueron:

a) ácido acético glacial (JT Baker),

b) ácido fórmico (BDH Limited Poole England),

c) acido oxálico (Riedel de Haen),

d) hidroquinona (Fisher Scientific) y

e) fenol.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de la muestra antes del tratamiento

Según los resultados de los análisis químicos, los componentes de la muestra sintética inicialmente sobrepasa los límites de concentración permisibles para las descargas establecidas por la norma venezolana de aguas, según Decreto 883, 1995 [26], el cual establece las condiciones de descarga en efluentes y plantas de tratamientos para los contaminantes acuosos, tal como se observa en la Tabla 2. Donde se evidencia el carácter contaminante de este compuesto en solución y la necesidad de la aplicación de un tratamiento para poder ser descargado a los sistemas municipales e industriales de aguas servidas.

Tabla 2: Caracterización de la muestra y los valores permisibles por la norma venezolana decreto 883

Parámetro	Valor obtenido	Valores permisibles
DQO (O_2 mg/L)	5140	900
pH	5,3	6–8
Fenoles (mg/L)	2000	0,5

3.2. Análisis de Varianza para DQO diseño de experimento factorial 2^3 con dos puntos al centro

En la Tabla 3 se muestra como solo la interacción lineal AB tiene un efecto significativo (p-valor: 0,0166) en la reducción de DQO, es decir, el catalizador lodo rojo neutralizado y calcinado (LRS400) en combinación con peróxido favorece la reducción de este parámetro por ende la de fenol, donde el catalizador es capaz de potenciar la generación de radicales libres en presencia del peróxido de hidrógeno [7]. La sinergia entre el catalizador (A) y el peróxido (B) es debido a la presencia de hierro (Fe^{+3}), titanio (Ti) y manganeso (Mn) en el catalizador, los cuales tienen una actividad catalítica en conjunto con un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno en los procesos de oxidación avanzada [27].

Por lo antes expuesto, el peróxido (valor-p: 0,0685) es de gran importancia por ser el agente oxidante en la reacción, a pesar de no haberse encontrado un efecto significativo en el ANOVA, de la misma forma no tienen relevancia la cantidad de catalizador (A valor-p 0,9469) y ajuste del pH (C valor-p 0,1671). Este DDE permitió obtener las condiciones de reacción para reducir la DQO de 5140 ppm a 300 ppm en un medio acuoso utilizando como catalizador lodo rojo activado para tratar una alta concentración de fenol.

En la Tabla 4 se muestran las corridas y las condiciones experimentales a las que fue sometida la solución de fenol, y se observa el tratamiento con mayor disminución de la DQO y del porcentaje de reducción de DQO. La variable de respuesta se redujo de la inicial 5140 mg O_2/L a 300 mg O_2/L, teniendo un porcentaje de reducción del 94,16 %, cuando se emplea la menor cantidad de peróxido, pero la mayor cantidad del catalizador (corrida 6), logrando de esta manera los valores más bajos en términos de la DQO. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Atharizade y Miranzadeh [28] quienes lograron una disminución entre 82 y 97 % de la reducción de la DQO y la concentración de fenol utilizando una fuente de Fe^{+2} comercial, peróxido de hidrógeno y un ajuste de pH a 3. Por otra parte, Ramos y colaboradores [22] obtienen un 94 % a pH 2,5 y un 96 % a pH 1,6 con un catalizador MgFeAl y una concentración de Fenol con 11000 ppm.

También se observa que al aumentar el pH a 3 (corrida 3) y trabajar con los niveles intermedios de las variables (corrida 1) se evidencia una reducción

Tabla 3: Análisis de varianza para DQO para el diseño de experimento factorial 2^3 con dos puntos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-*p*
A: Cant de Catalizador	60,5	1	60,5	0,01	0,9469
B: Cant de Peróxido	89888,0	1	89888,0	7,78	0,0685
C: pH ajustado	38088,0	1	38088,0	3,30	0,1671
AB	273061,0	1	273061,0	23,63	0,0166
AC	3960,5	1	3960,5	0,34	0,5994
BC	34848,0	1	34848,0	3,02	0,1809
Error total	34665,4 3	11555,1			
Total (corr.)	474571,0	9			

Tabla 4: DDE factorial 2^3 con dos puntos al centro y las variables de respuesta DQO y concentración de fenol, con sus respectivos blancos

Corrida y Códigos ABC	pH ± 0,01	DQO (O_2 mg/L) ± 0,1	%Reducción de la DQO ± 0,01	[Fenol] (mg/L) ± 0,1	% Reducción de Fenol ± 0,01
0	5,75	5140	-	2000	-
1(0,0,0)	2,31	2290	55,45	785,2	60,75
2(1,1,1)	3,28	7050	-37,15	1647,4	17,65
3(1,-1,1)	2,65	2090	76,84	262,8	86,86
4(0,0,0)	2,8	3760	26,84	1386,3	30,71
5(-1,1,1)	2,55	3390	34,04	366,9	81,73
6(1,-1,-1)	1,92	300	94,16	5,86	99,71
7(-1,-1,1)	2,9	6750	-31,32	1753,2	12,35
8(-1,-1,-1)	2,1	3140	38,91	945,5	52,75
9(1,1-1)	2,01	6970	-35,6	1509,3	24,55
10(-1,1,1)	2,05	3350	34,82	852,1	54,44
Fenton-like(6)	2,2	2280	55,64	665,4	66,73
Peroxidación/UV solar	3,47	3290	35,99	1052,9	47,48
Fenol/UV solar	4,54	4620	10,11	1654,7	17,36
Fenol/CAT/ UV solar	9	4410	14,2	1511,8	24,41
Replica corrida 6	1,98	307,8	94,01	5,84	99,56

en la DQO reduciendo la concentración inicial de 2090 y 2290 mg O_2/L respectivamente, esto valores representan un rendimiento aproximado de la reacción en un 76 y 55 %. Coincidiendo este último resultado con los obtenidos por Juzsakova y colaboradores [29] quienes trataron con ácido el lodo rojo para neutralizarlo seguido de una calcinación a 400 °C aumentando la conversión catalítica del etil-benceno hasta el 58 %.

El efecto que tiene el ajuste del pH en la reacción de POA es un indicador importante para determinar si la reacción de oxidación avanzada tiene un efecto positivo en la degradación o mineralización de un compuesto, debido a que una disminución considerable del pH, es indicativo de la formación de especies orgánicas oxidadas como los ácidos carboxílicos [30]. Los resultados muestran que una variación de pH por encima de 2, afecta el porcentaje de reducción, sin embargo, los resultados son buenos, un 55,45 % para un pH 3 y un 76,84 % para pH 4, estos resultados también dependen de la cantidad de catalizador y la cantidad de peróxido de hidrógeno. En esta investigación se tomó en cuenta que las reacciones de tipo fotoquímicas tienen un mejor desempeño a pH ácido [7, 31, 32].

A medida que se incrementa el pH existe un efecto que imposibilita la reacción de degradación. Para esto, se puede considerar el mecanismo propuesto para la fotodegradación de compuestos orgánicos con catalizadores que contienen Fe según Ramos [33] y Zhang y colaboradores [34]. Los

autores antes mencionados consideran que el Fe^{+3} en la superficie del catalizador en presencia de la radiación se fotoreduce a Fe^{+2} (ecuación (4)), y con la adición del peróxido éste se aproxima al catalizador y reacciona en la superficie con el Fe^{+2} para producir radicales hidroxilos (ecuación (3)) [7, 8, 9]. Mientras más básico sea el pH del medio, la interacción entre el catalizador y la molécula del peróxido (con pares de electrones desapareados) es mínima debido a repulsión electrostática y por tanto no ocurrirá la interacción entre el peróxido de hidrógeno y el hierro en el catalizador, viendo este efecto en las corridas de los blancos fenol/UV solar con un pH cercano a 6, y la corrida con fenol/catalizador/UV solar con un pH de 9. A medida que se acidifica la solución, los sitios básicos son protonados (H^+) formándose $-M-OH^{2+}$ [33, 35], y de esta manera ocurre la aproximación entre el peróxido de hidrógeno y el catalizador para la producción del •OH, mejorando la degradación de la especie orgánica como en las corridas con pH 2 y 3. En este orden de ideas ha sido reportado que bajo pH ácido la superficie protonada de óxidos de hierro favorece la formación de complejos de esfera interna: óxido-fenol [33, 34].

Por lo tanto, las condiciones de pH en los procesos fotocatalíticos afectan notablemente este tratamiento ya que se han obtenido buenos resultados empleando TiO_2 a diferentes rangos de pH, se han reportado excelentes rendimientos a pH ácidos [36]. Lo que hace suponer que éste compuesto en la superficie del catalizador realiza un aporte importante en la generación de radicales en el medio acuoso, fungiendo como un cocatalizador en el lodo rojo.

En esta investigación se consideraron como resultados positivos de la DQO a todos aquellos que logran una disminución del valor de DQO con respecto al valor inicial de la concentración de fenol (5140 ppm), tal y como ocurre en las corridas 1, 3, 4, 5, 6, 8, y 10 (Tabla 4). Por el contrario, el incremento de la DQO en las reacciones representan un valor negativo en el porcentaje del mismo, como se observa en las corridas 2, 7 y 9. El incremento de los valores de la DQO pueden deberse a que ocurran fotoreacciones incompletas realizando una polimerización del fenol, debido a que al iniciar la reacción entre el fenol y los radicales oxhidrilos se producen una serie de reacciones en la que dos o más radicales fenoxi se acoplan, dando lugar a la formación de otros intermediarios más complejos o polimerizados, tal y como lo afirman Mantilla y colaboradores [37], además de Ramos y colaboradores [38].

Cuando existe un exceso de peróxido en la reacción se experimenta una desmejora en la degradación de la materia orgánica debido a las reacciones inhibitorias y competitivas de los radicales generados por la descomposición del peróxido en exceso, como afirman Shu y colaboradores [39]; Primo [40], Centeno y Jiménez [7]. Esto explica los resultados obtenidos en las corridas 2, 5, 9 y 10 donde se incrementa considerablemente la cantidad de peróxido de hidrógeno, que lejos de lo que se puede pensar, no ocurre una significativa disminución de la DQO y de la concentración de fenol en las corridas 5 y 10, sino que más bien la muestra tiende a complejizarse y aumentar la cantidad de materia orgánica.

Por otra parte, bajo las condiciones experimentales de la corrida 6 se alcanza la menor concentración de fenol pasando de 2000 a 5,86 ppm de fenol, resultando en una fotodegradación de la molécula de un 99,71 %. Estos resultados evidencian que el lodo rojo neutralizado con salmuera y tratado térmicamente (LRS400) presenta especies en superficie que en presencia de un agente oxidante generarán especies radicales como el oxidrilo que permiten la degradación de los compuestos orgánicos específicamente del fenol a altas concentraciones. En la Tabla 4 también se evidencia el comportamiento en la reducción de fenol bajo las condiciones de las corridas 2, 7 y 9 pero la DQO no experimenta una disminución, lo cual pudiese deberse a la formación de especies transitorias complejas que no evidencian la reducción de la DQO [24, 37, 41].

Los blancos que se registran en la Tabla 4, permitieron analizar el comportamiento de cada subproceso de oxidación existente en la degradación de la especie molecular. El primer blanco se refiere al proceso Fenton-like(6), el cual consistió en aplicar las condiciones experimentales de la corrida 6, pero sin aplicar

radiación solar. Evidenciándose en esta reacción POA no fotoquímico una reducción de la DQO equivalente al 55,64 % de la inicial y una reducción de la concentración de fenol en un 66,73 %, evidenciando la eficiencia de este tipo de POA. Estos resultados obtenidos con la reacción no fotoquímica Fenton-Like son inferiores a los obtenidos con la técnica fotoquímica, lo que evidencia que la fuente de radiación sobre la reacción incrementa sustancialmente la generación de radicales libres y en consecuencia mejora el rendimiento de la reacción fotoquímica considerablemente [9, 12, 42, 43].

La peroxidación (H_2O_2/UVsolar) es el segundo blanco donde se logró degradar la DQO en un 35,99 % y la concentración de fenol en un 47,4 % debido a la generación de radicales hidroxilo como consecuencia de la fotolisis del peróxido de hidrógeno [39, 40, 44]. Éste resultado corrobora la acción del oxidante en la generación de radicales libres permitiendo mejorar el rendimiento de la reacción y la eficiencia de la misma.

También se observa la fotolisis del fenol (fenol/UV) durante el periodo de tiempo de 4 h bajo condiciones de radiación solar, obteniéndose una fotolisis del fenol, con una disminución de la DQO 11,10 % y en cuanto al fenol en solución de 17,3 %. La exposición de la solución de fenol con el catalizador (fenol/cat), permitió obtener información del impacto que tiene el catalizador lodo rojo (LRS400) en condiciones de radiación solar para la disminución de las variables de respuesta. Bajo las condiciones experimentales de la corrida 6 en cuanto a la adición de la cantidad de catalizador, éste logró obtener resultados en la reducción de la DQO en un 14,20 % y en cuanto a la reducción en porcentaje de la concentración de fenol disminuyó en 24,41 %, esto pudiese deberse a la generación de radicales libres en medio acuoso del TiO_2 [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Así como también puede deberse a la acción del óxido férrico como un fotocatalizador tipo semiconductor [45, 46, 47, 48, 49].

3.3. Determinación de la coincidencia espectral de los patrones secundarios o los productos de degradación por Cromatografía de Gases Acoplada a Espectroscopia de Masa

Para la identificación por HPLC de los subproductos de la degradación de fenol, se generaron patrones secundarios a partir de reactivos comerciales disponibles en el laboratorio, y se les determinó su grado de coincidencia espectral mediante GC/MS. Los patrones fueron seleccionados de acuerdo a la reacción de oxidación de fenol con los procesos de oxidación avanzada, que conlleva a la hidroxilación de fenol a hidroquinona y catecol como un primer paso. Seguidamente ocurre una oxidación adicional de los hidroxilbencenos para formar benzoquinonas, que finalmente se degradan en ácidos orgánicos de cadenas cortas [41]. Por tanto, para la identificación de los subproductos se escogieron como patrones la hidroquinona y los ácidos acético, fórmico y oxálico. Adicionalmente se consideró el fenol, a fin de identificarlo en los casos donde no hubo una degradación completa.

En la Tabla 5 se muestra el análisis realizado por GC/MS donde se identifican los compuestos mencionados encontrándose las siguientes coincidencias espectrales: fenol 96 %, ácido oxálico 95 %, hidroquinona 94 %, ácido fórmico 94 % y ácido acético 87 %. También se observan con un asterisco los solventes usados en la determinación del patrón, los tiempos de retención y el orden de elución de los compuestos. Estos resultaron permitieron obtener los patrones secundarios necesarios para identificar estas especies mediante HPLC en las muestras oxidadas por los POA aplicados a la solución de fenol.

3.4. Identificación de los productos de la degradación del fenol por Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)

La identificación por HPLC de los subproductos de la degradación de fenol con lodo rojo se realizó mediante la preparación de soluciones madres de los ácidos oxálico, acético, fórmico, fenol e hidroquinona, con una concentración de 1000 ppm en metanol grado HPLC. En este sentido, se tomó la propuesta de Hasib y colaboradores [50].

Tabla 5: Componentes de la muestra patrón por el método de compuestos orgánicos en mezclas complejas por GC-MS

Orden de elución	Tiempo de retención (min) ±0,001	Nombre del compuesto	Coincidencia espectral (%) ± 1	Área (% del Total) ± 1
1	0,722	Metanol*	81	-
2	9,71	Hidroquinona	94	100
1	0,74	Metanol*	80	-
2	0,799	Ácido fórmico	94	100
1	0,758	Diclorometano*	91	-
2	0,883	Ácido acético glacial	87	100
1	0,752	Diclorometano*	89	-
2	2,934	Fenol	96	100
1	0,717	Metanol*	91	-
2	0,758	Diclorometano*	93	-
3	2,513	Ácido oxálico	96	100

*: solventes usados en la determinación del patrón.

Tabla 6: Identificación de subproductos de la degradación de fenol con POA solar y lodo rojo como catalizador

Muestra	% Oxidación de fenol ± 0,01	Tiempo de retención (min)				Compuestos identificados
DDE2 Corrida 6	99,71	3,029	3,193	-	-	Ácido oxálico y ácido fórmico.
Rep DDE2 Corrida 6	99,56	3,014	3,285	-	-	Ácido oxálico y ácido fórmico.
Fenton-like	66,73	2,997	3,274	3,901	-	Ácido oxálico, ácido fórmico, hidroquinona.
Fenol/H_2O_2/UV solar	47,4	3,042	11,32	-	-	Ácido oxálico y fenol.
Fenol/catalizador/UV solar	24,41	3,068	3,131	3,6	11,275	Ácido oxálico, ácido fórmico, ácido acético, fenol.
Fenol/UV solar	17,3	3,055	3,601	12,054	-	Ácido oxálico, ácido acético y fenol.

Además de Ramos y colaboradores [30] donde utilizaron una fase móvil agua/metanol con un pH 4 obtenido con la adición de ácido fosfórico 0,1 M. Adicionalmente, se seleccionó una longitud de onda para la inyección de los patrones de 254 nm y 220 nm, obteniendo con ésta última los valores más altos de absorbancia para los patrones estudiados. Para determinar el flujo de la fase móvil se realizaron inyecciones de los patrones a 1, 0,5 y 0,25 mL/min y se compararon con los tiempos de retención.

La Figura 2 muestra la secuencia cromatográfica obtenida para la separación de los productos de degradación de fenol y de acuerdo a las condiciones operacionales optimizadas se analizaron las muestras patrones. El pico cromatográfico muestra primero al ácido oxálico eluyendo a un tiempo de retención de 3,061 min, seguido del ácido fórmico con un tiempo de 3,294 min, el ácido acético eluyó a 3,604 min, la hidroquinona fue el siguiente patrón en salir con un tiempo de 3,917 min y por último el fenol con un tiempo de retención de 11,270 min. Estos resultados presentan picos con tiempos de retención bien definidos entre sí.

En la Tabla 6, se presentan las muestras tratadas y sus respectivos porcentajes de degradación en base a la concentración inicial y final del fenol y los tiempos de retención de los subproductos para el mejor resultado de las corridas experimentales y sus correspondientes blancos. De acuerdo a los

resultados, en la degradación de las soluciones de fenol con POA solar, en la corrida 6 y su réplica se identificó por HPLC: ácido oxálico y fórmico, logrando una degradación a ácidos de cadena corta [50]. Adicionalmente, en el caso de la reacción Fenton-like donde se logró una degradación menor se identificó hidroquinona en las muestras. Se podría decir que la oxidación no fue tan directa, porque obtuvo mayor cantidad de subproductos de menor grado de oxidación, típica de los procesos de oxidación avanzada incompletas [24].

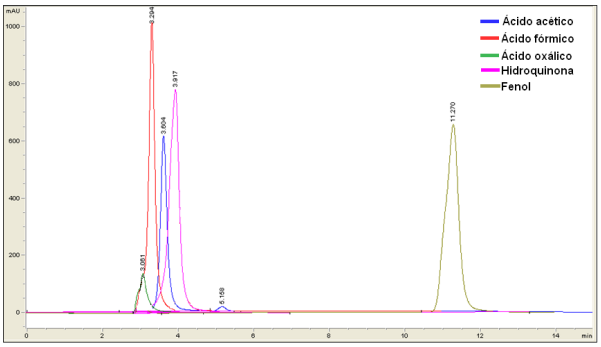


Figura 2: Cromatograma de los patrones estudiados

El análisis por HPLC mostró que la degradación de fenol con peróxido y UV solar, presentó ácido oxálico y fenol, mostrando que hubo oxidación, pero al mismo tiempo resulto no ser suficiente para la formación de radicales libres en la degradación completa del fenol. Por otra parte, La degradación de fenol con el catalizador lodo rojo LRS400 y radiación solar mostró que la degradación del fenol fue menor, observándose una oxidación incompleta en la identificación de ácidos oxálico, fórmico, acético y el remanente de fenol, propio de la oxidación incompleta de la reacción. Este resultado se debe a la generación de radicales libres fue únicamente por la acción de los óxidos tipo semiconductores presentes en el catalizador activados por la radiación solar [10, 11, 12, 13, 14, 15].

La fotolisis solar del fenol fue el proceso que obtuvo una menor oxidación porcentual del, con respecto a las especies identificadas por HPLC (ácido oxálico, ácido acético y fenol), lo que evidencia que la oxidación por esta vía es incompleta debido al fenol que no reaccionó.

3.5. Mecanismo de reacción propuesto para los POA solar con lodo rojo como catalizador

En la Figura 3 se observa el mecanismo de reacción propuesto para la degradación de fenol a partir de los POA solar y lodo rojo como catalizador. Este mecanismo surge de la revisión bibliográfica realizada con relación a la formación de especies de hidratación y de acuocomplejos del hierro en el lodo rojo, mediante lo propuesto por Jang y colaboradores [52] en combinación con los autores [7, 8, 9] para la graficar la interacción con la radiación solar y la formación de radicales oxhidrilo. En el mismo orden de ideas se representó la acción del óxido de titanio y su efecto en medio acuoso para la generación de radicales y la degradación de materia orgánica [10, 11, 12, 13, 14, 15]. La formación de radicales oxidrilo por vía fotoquímica y fotocatalítica sustenta el inicio al proceso de oxidación del fenol.

En el lodo rojo las principales especies fotoactivas que se encuentran son el óxido férrico (hematita) y el óxido de titanio (anatasa). La unidad estructural básica de la mayoría de los óxidos férricos (oxihidroxidos) es el octaedro donde Fe^{3+} se coordina a seis ligandos circundantes que pueden ser $O_2{}^-$, OH^- y H_2O [52]. En la primera fase, el complejo está compuesto por el sólido compuesto principalmente por $O_2{}^-$, siendo la estructura típica de la hematita ($\alpha - Fe_2O_3$) [46]. Las condiciones de ajuste de pH de la reacción conducen a la segunda fase del complejo donde se evidencia la hidratación y la dilución del compuesto permitiendo la formación de un acuocomplejo $[\ddot{}Fe_3{}^+L]^n$ [52]. Esta especie compleja de Fe^{3+} sufre foto-reducción a una longitud de onda de 580 nm a través de una transferencia de carga-ligando-metal (LMCT) y los complejos intermediarios generados se disocian produciendo Fe^{2+}, radical oxidrilo (•OH) y otros productos, tal como lo afirman [7, 24, 31, 53].

Por otra parte, el óxido de titanio (TiO_2) se comporta como un semiconductor tipo óxido permitiendo la fotocatálisis heterogénea involucrando la absorción de la radiación en un amplio rango del espectro solar entre 200-620 nm, en específico el TiO_2 tipo anatasa realiza una óxido-reducción generando un par electrón(e^-)–hueco (h^+).

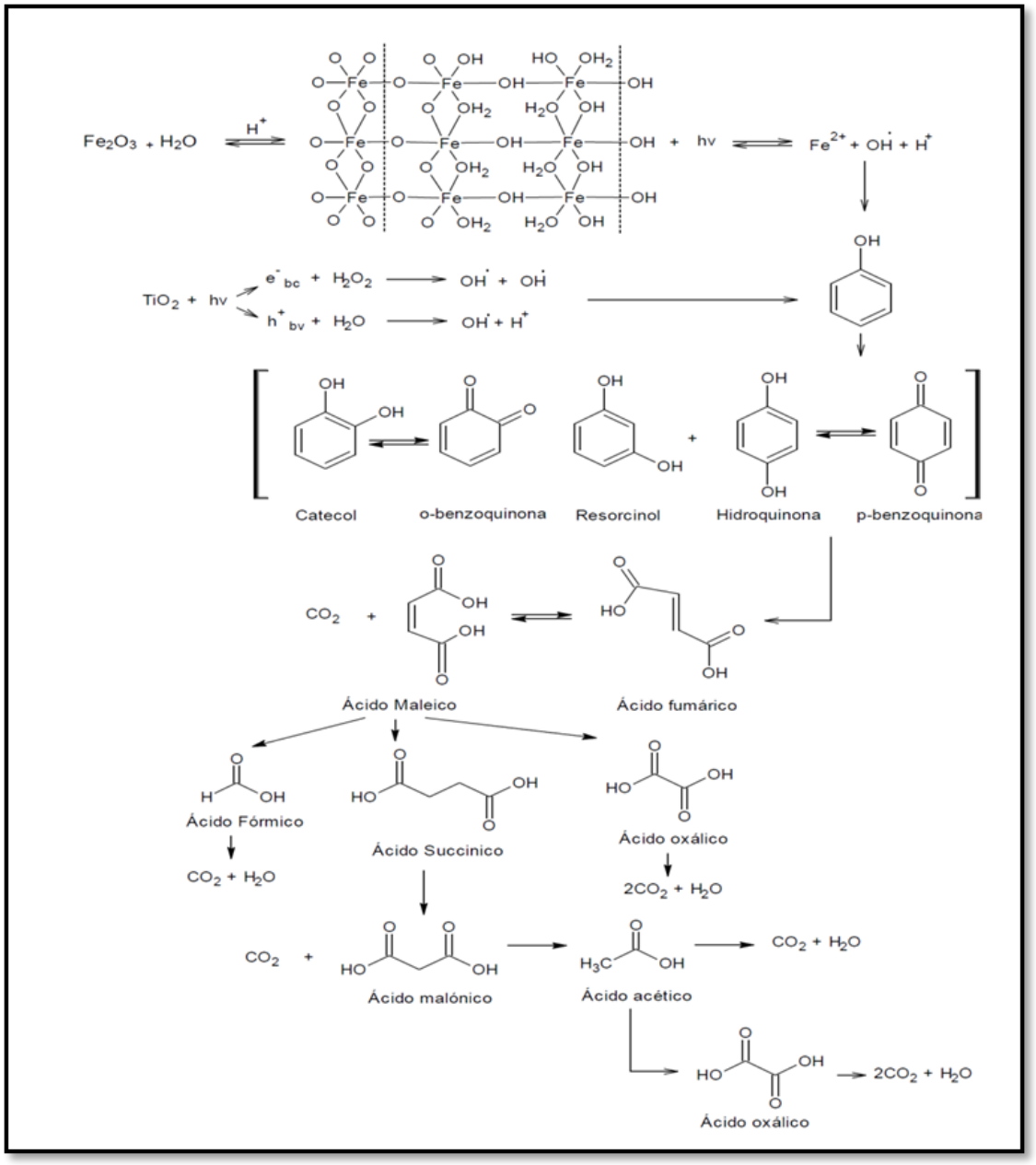


Figura 3: Mecanismo de reacción para la degradación de fenol mediante POA solar y lodo rojo como catalizador

Donde el electrón en la banda de valencia (bv) es excitado y promovido a la banda de conducción (bc). En la banda de valencia se genera un hueco (h^+) que va reaccionar con el agua del medio permitiendo una foto-oxidación del agua produciendo el radical hidroxilo (•OH) y un protón al medio. En la banda de conducción el electrón excitado (e^-) va a producir la fotoreducción del peróxido de hidrógeno realizando una ruptura homolítica del mismo formando el radical hidroxilo (•OH) y este a su vez va reaccionar con el oxígeno del medio y va formar el radical superóxido (O_2•) [10, 11, 12, 13, 14, 15].

La formación de radicales oxidrilo por vía fotoquímica y fotocatalítica son las especies que darán inicio al proceso de oxidación del fenol. Generalmente se considera que comienza la oxidación con una transferencia de electrones que conduce a la formación del radical fenoxi reaccionando este a su vez con el oxígeno del

medio [54, 55]. Este radical fenoxi permite la hidroxilación formando los dihidoxilbencenos a través de los productos de sustitución del OH ortohidroxilación para la formación de catecol, metahidroxilación para el resorcinol y la parahidroxilación de la hidroquinona [56], que con una oxidación adicional y el correspondiente reeemplazo de los hidrógenos por grupos OH se forman las o-benzoquinonas y p-benzoquinonas tal y como afirman Eftaxias y colaboradores [51]. Por su parte, la apertura del anillo de la hidroquinona genera directamente ácidos insaturados como maleico y furmárico [56, 57]. Las benzoquinonas pueden ser degradadas a través del ácido 2,5-dioxo-3-hexenodioico, es decir sin pasar por el ácido maleico, debido a que este ácido es altamente reactivo y efímero, por lo que las benzoquinonas podrían producir directamente ácido oxálico [51].

El ácido oxálico se genera por el ataque del oxígeno al doble enlace carbono-carbono del ácido maleico para formar ácido oxálico, dióxido de carbono y agua [51]. El ácido fórmico se produce debido a una oxidación catalítica del ácido maleico [58]. El ácido maléico se reduce para formar el ácido succinico, y a su vez el ácido malónico, como ácido dicarboxílico sufre una descarboxilación para la formación de ácido acético, dióxido de carbono y agua [59, 60]. La formación del ácido oxálico a partir del ácido acético puede explicarse como una ruta de terminación en la oxidación por radicales libres del ácido acético. En este proceso, un radical hidroxilo ataca al compuesto alifático para eliminar un átomo de hidrógeno unido al carbono y los radicales libres [°COOH] para así formar el ácido oxálico [61]. Es importante resaltar que la formación de dióxido de carbono depende de la relación fenol /oxígeno produciéndose en cada paso desde el comienzo de la reacción, lo que indica que el mecanismo para la formación del dióxido de carbono debe ocurrir desde la reacción de hidroxilación [59].

4. Conclusiones

La degradación de fenol como molécula modelo utilizando oxidación avanzada solar y lodo rojo como catalizador fotoactivo, mostró excelentes resultados alcanzándose una disminución de la DQO del 94,1 % y 99,7 % de la concentración de fenol, lo cual pone en evidencia que los procesos de oxidación de tipo fotoquímico como el fotoFenton-like y la fotocatálisis a partir de un desecho metalúrgico activado es capaz de generar la suficiente producción de radicales hidroxilo en sinergia con el peróxido de hidrógeno para generar la degradación y mineralización del compuesto modelo. La técnica de GC/MS permitió seleccionar patrones secundarios con alta coincidencia espectral que garantizó la identificación de las especies orgánicas mediante la técnica HPLC. Las especies identificadas como principales productos de las reacciones fueron ácido oxálico y ácido fórmico en los casos de mayor degradación. Para los casos de menor porcentaje de degradación se determinó que el fenol quedaba remanente en la solución. Es relevante resaltar que la relación DQO: H_2O_2 es importante para lograr los mejores resultados de degradación y mineralización, utilizando esta técnica y el catalizador se logra disminuir la relación a la mitad de la reportada por la literatura.

5. Referencias

[1] G. Busca, S. Berardinelli, C. Resini, and L. Arrighi, "Technologies for the removal of phenol from fluid streams: a short review of recent developments," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 160, no. 2–3, pp. 265–288, 2008.

[2] M. Suárez-Ojeda, J. Carrera, I. Metcalfe, and J. Font, "Wet air oxidation (WAO) as a precursor to biological treatment of substituted phenols: Refractory nature of the WAO intermediates," *Chemical Engineering Journal*, vol. 144, pp. 205–212, 2008.

[3] E. Garrido-Ramirez, B. Theng, and M. Mora, "Clays and oxide minerals as catalysts and nanocatalysts in Fenton-like reactions-A review," *Applied Clay Science*, vol. 47, no. 3–4, pp. 182–192, 2010.

[4] J. Ñungo Moreno, J. Carriazo, S. Moreno, y R. Molina, "Degradación fotocatalítica de fenol empleando arcillas pilarizadas con Al−Fe y Al−Cu," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 35, no. 136, pp. 295–302, 2011.

[5] G. López, R. García, y J. Orduña, "Estudio de la oxidación fotocatalítica de soluciones fenólicas, aplicando un proceso avanzado de oxidación (H_2O_2 / UV)," *Ingenium*, vol. 6, no. 12, pp. 61–67, 2012.

[6] M. Hincapié-Pérez, "La fotocatalisis en el tratamiento de aguas contaminadas," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 1, no. 1, pp. 83–91, 2002.

[7] G. Centeno y Y. Jiménez, "Uso de Lodos Rojos como catalizador en los procesos de oxidación avanzada: una aproximación al estado del arte," *Rev. Tekhné.*, vol. 21, no. 4, pp. 026–040, 2018.

[8] S. Malato, P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, J. Blanco, and W. Gernjak, "Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends," *Catalysis today*, vol. 147, no. 1, pp. 1–59, 2009.

[9] L. Doumic, "Nuevas estrategias para la oxidación catalítica de compuestos orgánicos en medio acuoso," Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 2015.

[10] O. Kartal, M. Erol, and H. Ouz, "Photocatalytic Destruction of Phenol by TiO_2 Powders," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 654–649, 2001.

[11] J. Pignatello, E. Oliveros, and A. MacKay, "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry," *Critical reviews in environmental science and technology*, vol. 36, no. 1, pp. 1–84, 2006.

[12] A. Babuponnusami and K. Muthukumar, "A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 557–572, 2014.

[13] Q. Guo, C. Zhou, Z. Ma, Z. Ren, H. Fan, and X. Yang, "Elementary photocatalytic chemistry on TiO_2," *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 13, pp. 3701–3730, 2016.

[14] D. Robert, N. Keller, and E. Selli, "Environmental photocatalysis and photochemistry for a sustainable world: a big challenge," *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 24, pp. 12 503–12 505, 2017.

[15] M. Nevárez-Martínez, P. Espinoza-Montero, F. Quiroz-Chávez, y B. Ohtani, "Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO_2," *Avances en Química*, vol. 12, no. 45–59, pp. 2–3, 2017.

[16] R. C. Costa, F. C. Moura, P. E. Oliveira, F. Magalhães, J. D. Ardisson, and R. M. Lago, "Controlled. reduction of red mud waste to produce active systems for environmental applications: heterogeneous Fenton reaction and reduction of Cr (VI)," *Chemosphere*, vol. 78, no. 9, pp. 1116–1120, 2010.

[17] B. Galbičková, M. Soldán, M. Belčík, and K. Balog, "Removal Of Phenol From Wastewater By Using Low-Cost Catalyst From Metal Production," *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, vol. 22, no. 341, pp. 55–59, 2014.

[18] M. Ma, G. Wang, Z. Yang, S. Huang, W. Guo, and Y. Shen, "Preparation characterization, and photocatalytic properties of modified red mud," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, 2015.

[19] C. Gromboni, A. Ferreira, R. Nogueira, and A. Kamogawa, "Avaliacao da reacao fotofenton na descomposicao de residuos de carraticida," *Quimica nova*, vol. 30, pp. 264–267, 2007.

[20] J. Sarasa, T. Llabrés, P. Ormad, R. Mosteo, and J. Ovelleiro, "Characterization and photo-Fenton treatment of used tires leachate," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, no. 3, pp. 874–881, 2008.

[21] D. Napoleão, R. Pinheiro, L. Zaidan, J. Rodríguez-Díaz, A. Araújo, M. Montenegro, and V. Silva, "Validation of a chromatographic method for amoxicillin determination in wastewaters after its degradation by advanced oxidation process," *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 24, pp. 10 988–10 994, 2016.

[22] K. Ramos, Y. Jiménez, y C. Linares, "Síntesis y caracterización de óxidos: MgAl, MgFe, FeAl y MgFeAl para la degradación de fenol con foto-fenton solar." *Rev. LatinAm. Metal. Mat*, vol. 35, pp. 315–325, 2016.

[23] E. Yamal-Turbay, E. Jaén, M. Graells, and M. Pérez-Moya, "Enhanced photo-Fenton process for tetracycline degradation using efficient hydrogen peroxide dosage," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 267, pp. 11–16, 2013.

[24] K. Ramos y Y. Jiménez, "Aplicación de diseño de experimentos en la degradación de desechos por el proceso foto-Fenton heterogéneo usando un óxido mixto de MgFeAl," *Saber*, vol. 28, no. 3, pp. 574–582, 2016.

[25] American Society for Testing and Materials, *ASTM D–5790–95. Standard Test Method for Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry*, ASTM International, 2012.

[26] República Bolivariana de Venezuela, Gaceta Oficial Extraordinaria Nº 5.021. Decreto Nº 883, *Normas para la Clasificación y Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*, Caracas, Venezuela, 1995.

[27] G. Centeno, Y. Jiménez, y J. V. García, "Caracterización fisicoquímica de los lodos rojos neutralizados y calcinados con posible actividad catalítica en procesos de oxidación avanzada," *Tekhné*, vol. 23, no. 1, pp. 47–64, 2020.

[28] M. Atharizade and M. Miranzadeh, "Evaluation of efficacy of advanced oxidation processes Fenton, Fenton-like and photo-Fenton for removal of phenol from aqueous solutions," *J. Chem. Soc. Pak*, vol. 37, no. 2, pp. 266–271, 2015.

[29] T. Juzsakova, A. Csavdari, Á. Rédey, T. Fráter, L. Dióssy, G. E. Popita, and J. Lauer, "Study on the alkylaton mechanism of isobutane with 1-butene using environmental friendly catalysts," *Environmental*

Engineering and Management Journal, 2014.

[30] K. Ramos, Y. Jiménez, M. C. Colmenares, L. Manganiello, y N. Mendoza, "Nota técnica: Identificación rápida de productos generados de la degradación por foto-Fenton solar mediante hplc con detección UV," *Revista Ingeniería UC*, vol. 21, no. 1, pp. 87–92, 2014.

[31] A. Ribeiro, O. Nunes, M. Pereira, and A. Silva, "An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU," *Environment International*, vol. 75, pp. 33–51, 2015.

[32] M. Adán-Delgado, "Fotocatalizadores nanoestructurados de TiO_2 y $Fe-TiO_2$ para la degradación de compuestos aromáticos en medio acuoso empleando luz solar." Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias., 2015.

[33] K. Ramos, "Evaluación de procesos de oxidación avanzados: foto-fenton con luz solar para la degradación de sustancias y desechos líquidos tóxicos," Tesis Doctoral, Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería, 2018.

[34] S. Zhang, X. Zhao, H. Niu, Y. Shi, Y. Cai, and G. Jiang, "Superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles as catalysts for the catalytic oxidation of phenolic and aniline compounds," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 560–566, 2009.

[35] S. Sable, F. Medina, and S. Contreras, "Clofibric acid degradation by catalytic ozonation using hydrotalcite-derived catalysts." *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 150-151, pp. 30–36, 2014.

[36] S. H. S. Chan, T. Yeong Wu, J. C. Juan, and C. Y. Teh, "Recent developments of metal oxide semiconductors as photocatalysts in advanced oxidation processes (aops) for treatment of dye wastewater," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 86, no. 9, pp. 1130–1158, 2011.

[37] A. Mantilla, G. Jácome-Acatitla, G. Morales-Mendoza, F. Tzompantzi, and R. Gómez, "Photoassisted degradation of 4-chlorophenol and p-cresol using mgal hydrotalcites," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 5, pp. 2762–2767, 2010.

[38] K. Ramos, B. Sarrin, y Y. Jiménez, "Degradación de una mezcla de orto y para-nitrofenol mediante foto-fenton heterogéneo usando un óxido mixto de mgfeal como catalizador," *Revista Ingeniería UC*, vol. 22, no. 2, pp. 37–45, 2015.

[39] H. Y. Shu, H. J. Fan, M. C. Chang, and W. P. Hsieh, "Treatment of MSW landfill leachate by a thin gap annular UV/H_2O_2 photoreactor with multi-UV lamps," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 129, no. 1–3, pp. 73–79, 2006.

[40] O. Primo, "Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada," Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, 2009.

[41] F. Stüber, J. Font, A. Fortuny, C. Bengoa, A. Eftaxias, and A. Fabregat, "Carbon materials and catalytic wet air oxidation of organic pollutants in wastewater," *Topics in Catalysis*, vol. 33, no. 1–4, pp. 3–50, 2005.

[42] N. Mahamuni and Y. Adewuyi, "Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound and UV for waste water treatment: A review with emphasis on cost estimation," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 17, pp. 990–1003, 2010.

[43] A. Soon and B. Hameed, "Heterogeneous catalytic treatment of synthetic dyes in aqueous media using Fenton and photo-assisted Fenton process," *Desalination*, vol. 269, no. 1–3, pp. 1–16, 2011.

[44] P. Gogate and P. A., "A review of imperative technologies for a waste wáter treatment I: oxidation technologies et ambient conditions," *Advanced in Enviromental Research*, vol. 8, no. 3–4, pp. 501–551, 2004.

[45] M. Hoffman, S. Martin, W. Choi, and W. Bahnemann, "Enviromental applications of semiconductor photocatalysis," *Chem. Rev*, vol. 95, no. 1, pp. 69–96, 1995.

[46] Q. Wu, X. Hu, and P. Yue, "Mechanistic and kinetic studies of heteroheneus UV/fenton process for the oxidation of aquous organic pollutants: electron transfer at catalyst surface to initiate the redox process," *Hong kong productivity council*, vol. 15, no. 5, pp. 112–122, 2006.

[47] R. Shawabkeh, O. Khashman, and G. Bisharat, "Photocatalytic degradation of phenol using $Fe-TiO_2$ by different illumination sources," *International Journal of Chemistry*, vol. 2, no. 2, pp. 10–18, 2010.

[48] F. Martín, M. Cruz-Yusta, L. Sánchez, y J. Balbuena, "Nanofibras de hematita ($\alpha-Fe_2O_3$) para la eliminación de gases NOx mediante fotocatalisis," en *V Encuentro de Nanociencia y Nanotecnología de Investigadores y Tecnólogos Andaluces*, Córdoba, España, 2015.

[49] A. Rubio, E. Chica, y G. Peñuela, "Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico," *Ingeniería y competitividad*, vol. 16, no. 2, pp. 211–223, 2014.

[50] A. Hasib, A. Jaouad, M. Mahrouz, and M. Khouili, "HPLC determination of organic acids in moroccan apricot," *CYTA-Journal of Food*, 2002.

[51] A. Eftaxias, J. Font, A. Fortuny, J. Giralt, A. Fabregat, and F. Stüber, "Kinetic modelling of catalytic wet air oxidation of phenol by simulated annealing," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 33, no. 2, pp. 175–190, 2001.

[52] J. Jang, B. Dempsy, and W. Burgos, "Solubility of hematite revisited: effects of hidratation," *Environmental Science & Technology*, vol. 41, no. 21, pp. 7303–7308, 2007.

[53] J. Amigó, "Caracterización de la degradación de sulfametazina mediante foto-fenton (POA's)," Tesis doctotal, Universidad Politecnica de Catalunya, España, 2008.

[54] H. Lund and M. Baizer, *Organic Electrochemistry: An*

Introduction and a Guide, 3rd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1991.

[55] X. Y. Li, Y. H. Cui, Y. J. Feng, Z. M. Xie, and J. D. Gu, "Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes," *Water research*, vol. 39, no. 10, pp. 1972–1981, 2005.

[56] T. Olmez-Hanci and I. Arslan-Alaton, "Comparison of sulfate and hydroxyl radical based advanced oxidation of phenol," *Chemical Engineering Journal*, vol. 224, pp. 10–16, 2013.

[57] J. Zazo, J. Casas, A. Mohedano, M. Gilarranz, and J. Rodríguez, "Chemical pathway and kinetics of phenol oxidation by Fenton's reagent," *Environmental science & technology*, vol. 39, no. 23, pp. 9295–9302, 2005.

[58] A. Santos, P. Yustos, A. Quintanilla, S. Rodríguez, and F. García-Ochoa, "Route of the catalytic oxidation of phenol in aqueous phase," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 39, no. 2, pp. 97–113, 2002.

[59] H. R. Devlin and I. J. Harris, "Mechanism of the oxidation of aqueous phenol with dissolved oxygen," *Industrial & engineering chemistry fundamentals*, 1984.

[60] X. Li, Y. Cui, Y. Feng, Z. Xie, and J. Gu, "Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes," *Water research*, vol. 39, no. 10, pp. 1972–1981, 2005.

[61] L. Pernía, "Aplicabilidad del percarbonato de sodio obtenido de un pasivo ambiental en la oxidación de fenol en fase acuosa," Trabajo especial de grado, Magister Scientiarum en Ingeniería Sanitaria Mención Calidad de Agua, Universidad Central de Venezuela, 2019.

Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process

Carlos Medina-Valderrama [a], Wilmer Uriarte-Tirado *,[a], Ernesto Cardenas-Vásquez [b], Salvador Orrego-Zapo [a]

[a] *Universidad Nacional Autónoma de Chota. Chota, Perú.*
[b] *North Carolina State University, Estados Unidos.*

Abstract.- The objective was to evaluate the application of the Fenton process to degrade the wastewater of the municipal slaughterhouse of Chota–Peru, which contains high organic load and are a constant danger of contamination of bodies of water and soil. The parameters evaluated were: Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD), alkalinity, hardness, pH, conductivity, total solids, turbidity, temperature, oxidation-reduction potential (ORP) and dissolved oxygen (DO). A jar system with agitation at 30 r.p.m was used to treat the samples and different concentrations of $FeSO_4$, H_2O_2 and pH according to the Box–Behnken design and calculating their values using the response surface methodology with Statgraphics 5.1 plus software. The most suitable reaction time was calculated at 18 minutes and concentrations of $FeSO_4$, H_2O_2 and pH were estimated at 2110,55 mg/L, 1092,67 mg/L and 3,22 respectively. An improvement of the biodegradability indicator was observed at a value of 0,5 and a removal of the COD at around 79,9 %. The Fenton process turns out to be an effective alternative for the treatment of slaughterhouse wastewater and can be applied as a pre-treatment.

Keywords: Fenton process; residual water; recalcitrant substance.

Tratamiento de aguas residuales de camales mediante tecnologías avanzadas de oxidación: proceso fenton

Resumen.- El objetivo fue optimizar la aplicación del proceso Fenton para degradar las aguas residuales del camal municipal de Chota–Perú, que contienen alta carga orgánica y son un peligro constante de contaminación de cuerpos de agua y suelo. Los parámetros evaluados fueron: DBO_5, DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez, temperatura, potencial óxido-reducción (ORP) y oxígeno disuelto (OD). Se utilizó un sistema de jarras con agitación a 30 rpm para tratar las muestras y diferentes concentraciones de $FeSO_4$ y H_2O_2 y pH de acuerdo al diseño Box–Behnken y cálculo de sus valores mediante la metodología de superficies de respuesta con el software Statgraphics 5.1 plus. El tiempo de reacción más adecuado se calculó en 18 minutos y las concentraciones de $FeSO_4$, H_2O_2 y pH se estimaron en 2110,55 mg/L, 1092,67 mg/L y 3,22 respectivamente. Se observó una mejora del indicador de biodegradabilidad a un valor de 0,5 y una remoción de la DQO alrededor del 79,9 %. El proceso Fenton resulta ser una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales de camales y puede ser aplicado como pre-tratamiento.

Palabras clave: proceso Fenton; agua residual; sustancia recalcitrante.

Recibido: 19 de febrero, 2020.
Aceptado: 04 de mayo, 2020.

1. Introducción

Las aguas residuales del camal municipal de Chota–Perú son fluidos que se generan durante las operaciones de estabulación y faenado de los animales de beneficio tales como vacunos, porcinos y ovinos y de toda actividad de limpieza y desinfección que se ejecute dentro de las instalaciones del camal. Una vez transportados los animales descansan dentro de los corrales y antes de ser sacrificados son bañados para quitarles del cuerpo el polvo y las excretas, luego del sacrificio, la sangre, desechos de limpieza de vísceras y sustancias provenientes de la mucosa generan aguas residuales con altos índices de carga

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*wuriarte@unach.edu.pe (W. Uriarte-Tirado)

orgánica [1] y que son descargadas directamente sobre cuerpos de agua y suelo, lo que genera la aparición de vectores de infección, impacto visual negativo, malos olores [2][3] y un desbalance en el nivel de amortiguamiento natural de las aguas de la quebrada Colpamayo–Chota, lo que pone en riesgo la salud de las familias asentadas en las cercanías del camal y de aquellas que hagan uso del agua en su recorrido ya que la exposición a la contaminación es continua alterando seriamente a los ecosistemas [4].

El grado de contaminación de las aguas residuales de camales depende del tipo de animal sacrificado, grado de procesado y protocolos de limpieza [5], sin embargo; la alta concentración de materia orgánica tanto disuelta como en suspensión se debe principalmente a la presencia de aminas, proteínas, sustancias volátiles, ácidos orgánicos, pelos, grasas y material lignocelulósico [6], pero el desangrado es uno de los factores más críticos que contribuye a la contaminación de las aguas residuales de un camal por el alto poder contaminante de la sangre que fácilmente contribuye a rebasar los límites máximos permisibles establecidos en la normativa [7], así también; la presencia de grasas y aceites es de importancia en especial la fracción suspendida [5] ya que el exceso constituye un gran problema para tratamientos biológicos.

En tal sentido los procesos avanzados de oxidación (POA) han despertado interés en la actualidad por su versatilidad y eficacia para el tratamiento de aguas residuales [8][9], ya que los métodos de tratamiento convencionales tienen limitaciones frente a contaminantes recalcitrantes que los hacen lentos e ineficaces y pueden generar productos intermedios con mayor toxicidad [10]. El proceso Fenton constituye un POA que se ha probado en diversos tipos de aguas contaminadas tales como de la industria química [11], termoeléctrica [12],cosmética [13], agroquímica [14], textil [15], petroquímica [9], alimentaria [16] y en lixiviados de rellenos sanitarios [17], donde el mecanismo de reacción se ha estudiado con detenimiento y propuesto por varios investigadores, siendo los iones Fe^{+2} el catalizador y peróxido de hidrógeno el agente oxidante que en medio ácido generan radicales hidroxilos ($OH^{\bullet}$), donde el pH, temperatura, dosificación de reactivos y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos determinan la eficiencia total de la reacción [18][19]. En esencia los radicales $OH^{\bullet}$ son en extremo altamente reactivos y no selectivos con un potencial de oxidación de 2,8 V [20] capaz de abrir anillos de compuestos aromáticos, fenoles, nitrofenoles, aminas, aminas aromáticas, etc. [21] con altas velocidades de reacción provocando grandes cambios estructurales en los contaminantes hacia la degradación parcial (sustancias más facilmente biodegrables) o total (mineralización) permitiendo su posterior descarga sobre cuerpos de agua o suelo. El proceso Fenton puede estudiarse de acuerdo a las reacciones planteadas en la Tabla 1 cuyo fin es obtener radicales $OH^{\bullet}$ pero de manera controlada ya que estos pueden generar reacciones competitivas y de autoreacción, sin embargo; su efectividad está comprobada y la viabilidad depende de la optimización en la adición de los reactivos, tiempo de contacto y de las características fisicoquímicas finales del agua tratada y en función a ello puede utilizarse como pre o post tratamiento [22].

Tabla 1: Algunas de las posibles reacciones involucradas en el proceso Fenton [23]

$Fe^{+2} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{+3} + OH^- + OH^{\bullet}$	(1)
$Fe^{+2} + OH^{\bullet} \longrightarrow Fe^{+3} + OH^-$	(2)
$Fe^{+2} + HO_2^{\bullet} \longrightarrow Fe^{+3} + OH_2{}^-$	(3)
$Fe^{+3} + H_2O_2 \longrightarrow Fe^{+2} + OH_2^{\bullet} + H^+$	(4)
$Fe^{+3} + HO_2^{\bullet} \longrightarrow Fe^{+2} + O_2 + H^+$	(5)
$Fe^{+3} + O_2^{\bullet -} \longrightarrow Fe^{+2} + O_2$	(6)
$OH^{\bullet} + H_2O_2 \longrightarrow H_2O + HO_2^{\bullet}$	(7)
$2\,OH^{\bullet} \longrightarrow H_2O_2$	(8)
$2\,HO_2^{\bullet} \longrightarrow H_2O_2 + O_2$	(9)
$HO_2^{\bullet} + OH^{\bullet} \longrightarrow H_2O + O_2$	(10)
$H_2O_2 \longleftrightarrow OH_2{}^- + H^+$	(11)
$Fe^{+3} + H_2O_2 \longleftrightarrow [Fe(OH_2)]_2{}^+ + H^+$	(12)
$[Fe(OH_2)]^{+2} + H_2O_2 \longleftrightarrow [Fe(OH)(HO_2)]^+ + H^+$	(13)
$HO_2^{\bullet} \longleftrightarrow O_2^{\bullet -} + H^+$	(14)
$OH^{\bullet} \longleftrightarrow O^{\bullet -} + H^+$	(15)
$HO_2^{\bullet} + H^+ \longleftrightarrow H_2O_2^{\bullet +}$	(16)

En el Perú se han reportado estudios en el tratamiento de agua residuales de camales mediante tratamiento químico cal–sulfato de aluminio [24] y flotación por aire disuelto [6], sin embargo con respecto a la aplicación de proceso Fenton para este tipo de aguas residuales no han sido reportados.

Las aguas residuales de camal municipal de Chota–Perú no reciben ningún tipo de tratamiento y son vertidos directamente a las aguas de la quebrada Colpamayo lo que resulta un atentado al ambiente y a las personas que habitan en las cercanías, por tal motivo el objetivo del presente trabajo fue encontrar el pH y la dosis óptima de adición del reactivo de Fenton para lograr la máxima remoción de la DQO en las aguas residuales del camal.

2. Metodología

2.1. Toma de muestras de aguas residuales del camal

Las muestras fueron recolectadas del punto de descarga de aguas residuales del camal municipal Chota, ubicado en la zona urbana de la provincia de Chota–Perú. Se midió la temperatura *in situ* y las muestras se tomaron al azar en horario de faena de camal durante una hora en intervalos de 10 minutos entre muestreo y muestreo, luego se homogenizaron para obtener un volumen de 25 litros. Enseguida las muestras fueron colocadas en un depósito hermético y se transportaron en condiciones de oscuridad a la brevedad hacia el Laboratorio de Aguas Residuales de la Universidad Nacional Autónoma de Chota.

2.2. Acondicionamiento y análisis de muestras

Las muestras de aguas residuales del camal fueron filtradas utilizando papel filtro 125 mm de diámetro (Whatman) con la finalidad de eliminar el exceso de material lignocelulósico y restos de vísceras. Se efectuaron pruebas de caracterización inicial y final de acuerdo a las técnicas propuestas en el *Standard Methods* (APHA-AWWA-WPCF, 1992) y se calculó la demanda química de oxígeno (DQO) mediante oxidación con $K_2Cr_2O_7$ a reflujo cerrado a través de viales para análisis de DQO (Merck), que fueron luego colocados en un termorreactor (Velp Scientifica) a 150 °C durante 2 horas, después de enfriarse se tomaron las lecturas de absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis(PG instrument T80+) a 620 nm (L.D. 2 mg O_2/L).Para la demanda biológica de oxígeno (DBO_5) se utilizaron botellas oxi-top (Velp Scientifica) donde las muestras se incubaron a 20 °C con agitación, en condiciones de oscuridad durante 5 días. La alcalinidad, dureza, conductividad, sólidos totales, turbidez, potencial oxido-reducción (ORP), oxígeno disuelto (OD) y pH se midieron con un equipo multiparamétrico (Hanna Instruments). La aplicación del proceso Fenton se realizó en un equipo de prueba de jarras con agitación (Velp Scientífica) a 30 rpm y temperatura ambiente.

2.3. Plan experimental para aplicación del proceso Fenton

La Tabla 2 muestra los códigos y niveles de análisis usados para la optimización del proceso Fenton, se evaluaron las interacciones de tres variables independientes del proceso: $FeSO_4$, H_2O_2 y pH de acuerdo al diseño de experimentos Box–Behnken [25], obteniendo como variable de respuesta la remoción de contaminantes de las aguas residuales expresado como DQO. Varios autores establecen que el pH ideal para el proceso Fenton es 3 [26][27][28], sin embargo; otros trabajos también reportan que puede ser efectivo a pHs próximos a 2,5 y 4 con buenos resultados [29][30][31][32], en base a las evidencias revisadas se optó por evaluar el rango de pHs establecido en la Tabla 2 para las aguas residuales estudiadas y encontrar el pH más adecuado para el proceso.

Tabla 2: Código y niveles del Diseño Box–Behnken para aplicación del proceso Fenton

Variable independiente	Unidades	Símbolo	Código de niveles		
			-	0	+
$FeSO_4$	mg/L	X_1	1250	1875	2500
H_2O_2	mg/L	X_2	800	1000	1200
pH	0 – 14	X_3	2,5	3	3,5
Variable de respuesta: DQO					

Tabla 3: Plan experimental Box–Behnken para la aplicación del proceso Fenton

				Plan de experimentación		
Experimento	X_1	X_2	X_3	$FeSO_4$ (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)	pH
1	-	-	0	1250	800	3
2	-	+	0	1250	1200	3
3	+	-	0	2500	800	3
4	+	+	0	2500	1200	3
5	-	0	-	1250	1000	2,5
6	-	0	+	1250	1000	3,5
7	+	0	-	2500	1000	2,5
8	+	0	+	2500	1000	3,5
9	0	-	-	1875	800	2,5
10	0	-	+	1875	800	3,5
11	0	+	-	1875	1200	2,5
12	0	+	+	1875	1200	3,5
13	0	0	0	1875	1000	3
14	0	0	0	1875	1000	3
15	0	0	0	1875	1000	3

La Tabla 3 resume el desarrollo del plan experimental que se llevó a cabo de acuerdo al diseño seleccionado, se efectuaron 15 experimentos iniciales con dos réplicas obteniéndose en total 45 ensayos, las dosificaciones de reactivo, pHs y su respuesta en remoción de DQO son alimentados al software Statgraphics 5.1 Plus para la estimación de los valores más adecuados de los factores aplicando la metodología de superficie de respuesta y la contrastación de medias se efectuó mediante la diferencia mínima significativa con un $\alpha = 0,05$.

2.4. Estimación del tiempo de contacto de la reacción de Fenton

Se tomaron dos muestras de 500 mL de agua residual y se ajustó el pH a 3 con ácido sulfúrico concentrado (96,6 % p/p, ACS Fermont), a una muestra se adicionó los valores para el máximo nivel y a la otra los valores para el mínimo nivel de $FeSO_4\,7\,H_2O$ (99 % p/p, Merck) y H_2O_2 (30 % v/v, Merck) (Tabla 2). Primero se adicionó el $FeSO_4\,7\,H_2O$ homogenizando en un equipo de prueba de jarras durante 3 minutos a 50 rpm para facilitar su disolución, enseguida se agregó el H_2O_2 manteniendo agitación constante a 30 rpm y cada 5 minutos durante una hora se tomaron 10 mL del agua residual tratada, se neutralizó con NaOH (98,8 % p/p, Loba Chemie) para promover la sedimentación de los contaminantes y del hierro, luego se adicionó óxido de manganeso [33] para descomponer el H_2O_2 remanente y se procedió a filtrar, del filtrado se tomaron 2 mL y se agregó en un vial de análisis de DQO, se agitó y se colocó en el termorreactor. Luego de la digestión se dejó enfriar y se efectuaron las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro, cuyos valores obtenidos permiten calcular la equivalencia en porcentaje de remoción de la DQO. La remoción de la DQO_{TOTAL} se calculó con la ecuación (17):

$$\text{Remoción de DQO}(\%) = \frac{DQO_i - DQO_r}{DQO_i} \cdot 100, \tag{17}$$

donde:
DQO_i: representa la DQO inicial,
DQO_r: representa la DQO remanente.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización fisicoquímica inicial de las aguas residuales del camal

La Tabla 4 muestra la caracterización inicial de las aguas residuales del camal municipal de Chota, se observa que los valores de DQO y DBO_5 se encuentran muy por encima de lo que establece la normativa peruana para aguas residuales. El índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) es de 0,4 que es un indicativo de aguas residuales parcialmente biodegradables [34] por lo que es muy problable la presencia de moléculas orgánicas recalcitrantes

provenientes de los mismos residuos, esto es debido a las grandes cantidades de sangre, materia fecal, grasas, proteínas e insumos de limpieza y desinfección [6] que no lo hacen factible para una oxidación biológica efectiva. El valor de pH indica que las aguas residuales son ligeramente alcalinas, valores similares fueron reportados [6][24], así mismo se observa que el ORP adquiere valores negativos lo que indica que las aguas residuales tienen características de un entorno reductor, con una considerable disminución de la cantidad de OD y consiguiente reducción de iones y moléculas lo que se traduce en el alto valor de la DQO.

El valor medido para la dureza hace referencia a un tipo de agua residual muy dura lo que hace suponer altas concentraciones de calcio y magnesio, esto es debido a que en la ciudad de Chota se utiliza agua entubada sin tratamiento de potabilización, la que tiene alto contenido de sales y que sumada a los desechos de faenado provocan que tal valor se incremente. En cuanto a la alcalinidad su valor hace suponer altas concentraciones de carbonato, bicarbonato, ácido silícico, fosfatos y otros ácidos de carácter débil, sin embargo; por el valor de pH 7,6 se puede inferir que la especie química de mayor dominancia son los iones bicarbonatos. La turbidez tiende a un valor moderado, valores cercanos fueron reportados [5] y es un indicador de la cantidad de materia ionizable en especial impurezas solubles y esto guarda relación directa con el alto valor de sólidos totales disueltos, la que se debe principalmente a la abundancia de materia fecal, lignocelulósica y sangre que son vertidos sin ningún tratamiento aunque puede tratarse como material sedimentable.

3.2. Tiempo de reacción del proceso Fenton

La Figura 1 muestra que el tiempo de reacción más adecuado para llevar a cabo el proceso Fenton es de 18 minutos, en los primeros minutos se observó que el porcentaje de la remoción de DQO no es tan atractiva para ambas curvas, puesto que la reacción en cadena hacia la generación de radicales $OH^{\bullet}$ está en progreso para las condiciones establecidas, sin embargo; a partir de los 5 minutos hasta los 15 minutos el porcentaje de remoción de la DQO alcanza su máximo comportamiento

Tabla 4: Composición fisicoquímica inicial de las aguas residuales del camal municipal de Chota

Parámetro	Unidad	Valores iniciales
DBO_5	mg O_2/L	1874
DQO	mg O_2/L	4654,4
Dureza total	mg $CaCO_3$/L	1536
Alcalinidad total	mg $CaCO_3$/L	7200
Potencial de hidrógeno	pH	7,6
Conductividad	S/cm	1560
Sólidos totales	mg/L	3361
OD	mg O_2/L	1,22
Turbidez	NTU	327
ORP	mV	-273,1
Temperatura	°C	18,3

exponencial lo que probablemente se relaciona con la mayor presencia de radicales $OH^{\bullet}$ en la muestra tratada. A partir del minuto 18 no se apreció un cambio significante en la remoción de la DQO y la curva adopta un comportamiento asintótico. Entre los 30 a 35 minutos se observó una ligera disminución en la remoción de la DQO, esto se debe posiblemente a la generación de productos intermedios de la reacción y que pueden ser mas recalcitrantes que los iniciales. La revisión de antecedentes reportan tiempos muy próximos al calculado con gran efectividad [35], como también tan cortos como 1 minuto [14] y prolongados como 100 minutos [36], sin embargo; ello depende de la naturaleza química del agua a tratar y de las características finales deseadas, pero hay que tener en consideración que tiempos prolongados de tratamiento puede hacer inviable el proceso.

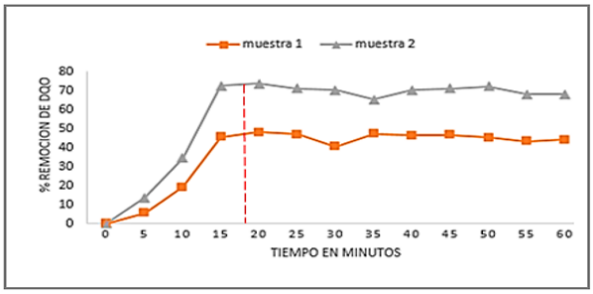
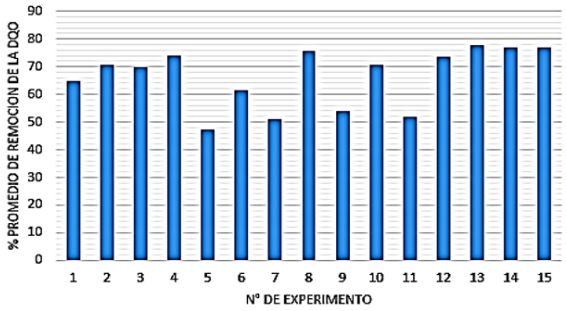


Figura 1: Tiempo de contacto estimado del reactivo de Fenton a pH ajustado a 3 sobre las aguas residuales del camal de Chota

3.3. Estimación de los factores del proceso Fenton

En la Figura 2 se observan los porcentajes promedio de remoción de la DQO de las aguas residuales del camal siguiendo el plan experimental de Box–Behnken. Los experimentos 4, 8, 10, 12, 13, 14 y 15 alcanzaron remociones por encima del 70 % de la DQO, ello corresponde a un pH que está en el rango de 3 a 3,5, las máximas remociones se alcanzaron a un pH muy próximo a 3, confirmándose lo predicho en la literatura, y de acuerdo a ello el pH estimado como el más adecuado para las aguas residuales estudiadas fue de 3,22 (Tabla 5). Los experimentos 5, 7, 9 y 11 presentaron bajas remociones a un pH 2,5 debido a que en condiciones muy ácidas se puede favorecer la formación de iones $[Fe(H_2O)_6]^{+2}$[37], el cual a su vez reacciona lentamente con el H_2O_2 haciéndose lenta la generación de radicales $OH^{\bullet}$. Por otro lado, un incremento del pH por encima de 4 conduce a la precipitación del Fe bajo la forma de $Fe(OH)_3$ e inhibe la regeneración del Fe^{+2} (ecuación (4)) y volver a empezar el proceso de oxidación (ecuación (1)), sin embargo; dicha posibilidad de recuperación del Fe^{+2} es bastante lenta y puede generar radicales $OH_2^{\bullet}$ que son también especies oxidantes pero no tan potentes como el radical $OH^{\bullet}$, pero dicho radical puede ser perjudicial para la oxidación Fenton ya que éste puede interactuar con el Fe^{+2} (ecuación (3)), H_2O_2 (ecuación (7)) y radicales $OH^{\bullet}$ (ecuación (10)) generando reacciones improductivas. Valores de pH por debajo de 2,5 no favorecen la oxidación Fenton, esto es debido a que el peróxido de hidrógeno se estabiliza mejor a tales condiciones en iones $(H_3O_2)^{+2}$ inhibiendo también la regeneración del Fe^{+2} (ecuación (12)).

Los porcentajes de las remociones de la DQO para cada ensayo fueron alimentados al software Statgraphics 5.1 plus de acuerdo al diseño propuesto, obteniéndose una superficie tridimensional con punto loma (Figura 3) que se ajusta a un modelo de segundo orden y propone un punto de optimización de las variables del proceso Fenton sobre las aguas del camal para la mayor remoción posible de la DQO.



*El orden de los experimentos está de acuerdo a la Tabla 3 en dosificación de reactivos y pH

Figura 2: Porcentajes de remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

Tabla 5: Estimación de los factores del proceso Fenton para la máxima remoción de la DQO en aguas residuales del camal de Chota

Factor	Valor adecuado	Remoción de DQO máxima estimada (%)
$FeSO_4$	2110,55 mg/L	
H_2O_2	1092,67 mg/L	80,28
pH	3,22	

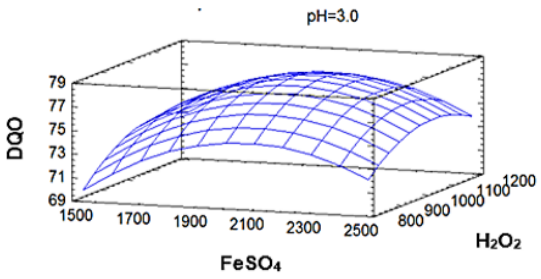


Figura 3: Superficie de respuesta estimada a pH ajustado a 3 para la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota

La Figura 4 muestra la proyección bidimensional de la superficie de respuesta estimada, donde cada contorno de las elipses formadas indica una infinidad de posibilidades de combinación de $FeSO_4$, H_2O_2 y pH para la remoción de la DQO. El punto más adecuado del proceso Fenton se sitúa dentro de la elipse pequeña siendo los valores estimados los que se indican en la Tabla 5. Tales concentraciones garantizan la generación eficiente

de radicales $OH^{\bullet}$ para la degradación máxima de los contaminantes, pero ello implica tener en observancia las reacciones improductivas, el efecto de barrido de los radicales $OH^{\bullet}$ y la regeneración del Fe^{+3} a Fe^{+2} que en efecto es muy lenta y provocaría que la reacción se detenga ante la ausencia de Fe^{+2}. Existen reportes de la utilización de $FeSO_4$ en el orden de 500 mg/L a 3300 mg/L y de H_2O_2 150 mg/L a 6000 mg/L [36][37] cuyos valores radican en el grado de complejidad de las sustancias a tratar, situándose dentro de éstas las aguas residuales del camal de Chota.

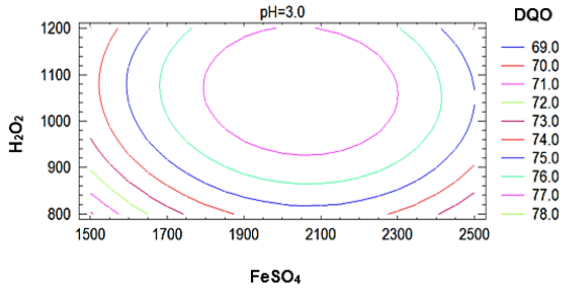


Figura 4: Contornos de superficie de respuesta estimada a pH ajustado a 3 para la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota

La Figura 5 muestra los efectos e interacciones de las variables del proceso Fenton estudiado, cada barra que traspase la línea indicada expresa que es estadísticamente significativo a un 95 % de confianza. Se observan siete efectos que tienen influencia sobre la remoción de la DQO, el estadístico R^2 ajustado fue de 96,4 % proponiendo que el pH es de gran importancia en el proceso seguido por el $FeSO_4$, H_2O_2, interacciones y efectos cuadráticos.

La Figura 6 muestra el comportamiento de los efectos estandarizados y corrobora lo observado en el diagrama de Pareto, la región por debajo de la línea estandarizada indica las interacciones de los factores con coeficientes negativos y por encima de la línea las interacciones con coeficientes positivos.

Las interacciones que más se alejan de la línea son más significativos, por tanto se observan tres efectos que marcan distancia de la línea arriba y que corresponden al pH, $FeSO_4$ y H_2O_2, esto quiere decir que un aumento en sus niveles de dosificación

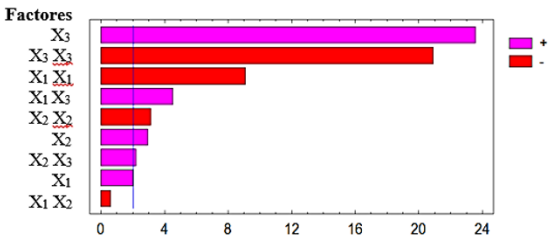


Figura 5: Diagrama de Pareto de los efectos e interacciones de los factores para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

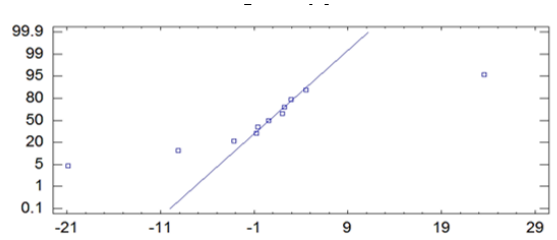


Figura 6: Probabilidad normal para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

conlleva a un aumento en la remoción de la DQO, por el contrario para el efecto negativo debajo de la línea un aumento se traduce en una disminución de la remoción de DQO (ecuación (18)). Los factores e interacciones que se encuentran sobre la línea no tienen un efecto de gran significancia puesto que corresponden a un estimado de los errores de los efectos.

La ecuación de regresión al modelo ajustado que expresa mejor la remoción de la DQO es (ecuación (18)):

$$\begin{aligned} DQO = & -472,501 + 0,0357713X_1 \\ & + 0,0684646X_2 + 296,687X_3 \\ & - 1,42187 \cdot 10^{-5}(X_1)^2 \\ & - 2,853 \cdot 10^{-6}X_1X_2 \\ & + 8,49867 \cdot 10^{-3}X_1X_3 \\ & - 4,76875 \cdot 10^{-5}(X_2)^2 \\ & + 1,2975 \cdot 10^{-2}X_2X_3 - 51,06(X_3)^2 \quad (18) \end{aligned}$$

El modelo matemático tiene una desviación normal para los residuos de 2,03 lo que hace

suponer que los datos no están muy dispersos y el error absoluto de la media es de 1,41 que es un valor pequeño lo que representa que el error de pronóstico es aceptable.

4. Aplicación del proceso Fenton con los factores optimizados

En la Tabla 6 se observa una mejoría en los parámetros analizados en las muestras de aguas residuales tratadas, se alcanzó una remoción máxima experimental para la DQO del 79,9 % muy próximo al valor estimado (Tabla 5). El valor de la DBO se redujo en un 75 % y el índice de biodegradabilidad (IB) alcanzó un valor de 0,5 lo que supone una agua residual más fácilmente biodegradable. La acidificación de las muestras y posterior neutralización favoreció la reducción de la dureza en 81 %, alcalinidad en 96 % esto es debido al cambio de pH que promovió la formación de flóculos y precipitación de la materia orgánica coloidal arrastrando a su paso iones y moléculas, mejorando a su vez la turbiedad de la solución por la gran cantidad de sólidos totales removidos (88 %).

Tabla 6: Composición Fisicoquímica después de la aplicación del proceso Fenton de las aguas residuales del camal de Chota

Parámetro	Unidad	Valores finales
DBO_5	mg O_2/L	468
DQO	mg O_2/L	934,14
Dureza total	mg $CaCO_3$/L	294
Alcalinidad total	mg $CaCO_3$/L	246
Potencial de hidrógeno	pH	7,1
Conductividad	μ S/cm	6063
Sólidos totales	mg/L	412
OD	mg O_2/L	6,1
Turbidez	NTU	7,4
ORP	mV	11,4
Temperatura	°C	16

El incremento de la conductividad se debe a la adición de las sales ferrosas y sales formadas por la neutralización de las muestras tratadas a pesar de ser removidas mediante la generación de lodos es probable aun la presencia de sus iones. El ORP alcanzó valores positivos lo que indica que el agua tratada se encuentra en un entorno oxidante, es decir; la disminución considerable de la DQO en el agua residual después del tratamiento permite observar una mejora sustancial del OD.

Tras la aplicación del proceso Fenton el IB solo mejoró un 20 % , por ello cabe la posibilidad que durante la oxidación se hayan formado compuestos orgánicos de cadena corta con características recalcitrantes, sin embargo un tratamiento biológico posterior puede eventualmente dar solución a este inconveniente.

5. Conclusiones

Las aguas residuales de camales fueron tratadas mediante el proceso Fenton siguiendo el diseño Box–Benhken. El tiempo de reacción más adecuado se calculó en 18 minutos y fue necesario aplicar un tratamiento primario de desbaste a las aguas. La aplicación de la metodología de superficie de respuesta calculó una dosificación de 2110,55 mg/L de $FeSO_4$, 1092,67 mg/L de H_2O_2 y un pH de 3,22, con ello se alcanzó una remoción máxima experimental de la DQO en 79,9 %. El análisis estadístico señala al pH como el factor de gran importancia en el proceso. Se notó una mejoría en el índice de biodegradabilidad (IB = 0,5) en el agua residual tratada así como en todos sus parámetros estudiados. Por tanto la aplicación del proceso Fenton sobre aguas residuales de camales resulta efectivo.

6. Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Autónoma de Chota por el apoyo a través del I concurso de financiamiento de trabajos de investigación científica y tecnológica para docentes con recursos del canon.

7. Referencias

[1] D. Muñoz, "Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: Para una población menor de 2000 habitantes," *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, vol. 3, no. 1, pp. 87–98, 2005.

[2] Y. Solarte, M. Peña, y C. Madera, "Transmisión de protozoarios patógenos a través del agua para consumo humano," *Colombia Médica*, vol. 37, no. 1, pp. 75–82, 2006.

[3] A. Rajab, M. Salim, J. Sohaili, A. Anuar, Salmiati, and S. Lakkaboyana, "Performance of integrated anaerobic/aerobic sequencing batch reactor treating poultry slaugtherhouse wastewater," *Chemical Engineering Journal*, vol. 313, pp. 967–974, 2017.

[4] V. Lahera, "Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales," *Quivera*, vol. 12, no. 2, pp. 58–69, 2010.

[5] L. Becerra, M. Horna, y K. Barrionuevo, "Nivel de contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región de la Libertad," *Revista del cuerpo médico del Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, vol. 7, no. 3, pp. 23–26, 2014.

[6] G. Salas y C. Condorhuamán, "Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado," *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 2008.

[7] D. Borja, K. Salazar, y H. Brito, "Cuantificación de efluentes de aguas residuales del camal frigorífico Riobamba," *Ciencia Digital*, vol. 3, no. 2, pp. 783–794, 2019.

[8] J. Sanz, J. Lombrana, y A. De Luis, "Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos dessarrollos futuras tendencias," *Afinidad–Barcelona*, vol. 70, no. 561, pp. 25–33, 2013.

[9] O. Pourehie and J. Saien, "Homogeneous solar Fenton and alternative processes in a pilot-scale rotatable reactor for the treatment of petroleum refinery wastewater," *Process Safety and Enviromental Protection*, vol. 135, pp. 236–243, 2020.

[10] G. Salas, "Tratamiento por oxidación avanzada (reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil," *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, vol. 13, no. 1, pp. 30–38, 2010.

[11] C. Kantar, O. Oral, O. Urken, N. Ayman, and S. Keskin, "Oxidative degradation of Chlorophenolic compounds with pyrite-Fenton process," *Envorimental Pollution*, vol. 247, pp. 349–362, 2019.

[12] M. Taco y E. Mayorga, "Aplicación del proceso Fenton en la disminución de la materia orgánica en aguas residuales de la industria termoelectrica," *Química Central*, vol. 3, no. 1, pp. 25–30, 2013.

[13] P. Bautista, A. Mohedano, M. Gilarranz, J. Casas, and J. Rodriguez, "Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewater treatment," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 143, pp. 128–134, 2007.

[14] H. Zhao and C. Kong, "Elimination of pyraclostrobin by simultaneous microbial degradation coupled with the Fenton process in microbial fuel cells and the microbial community," *Bioresource Technology*, vol. 258, pp. 227–233, 2018.

[15] Y. Quin, S. Luo, S. Geng, W. Jiao, and Y. Liu, "Degradation and mineralization of aniline by O3/Fenton process enhanced using high-gravity technology," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 26, no. 7, pp. 1444–1450, 2018.

[16] H. Lin, N. Oturan, J. Wu, H. Zhang, and M. Oturan, "Cold incineration of sucralose in aqueous solution by electro-Fenton process," *Separation and Purification Technology*, vol. 173, pp. 218–225, 2017.

[17] J. Nercolini, D. Hoefling, V. Trevisan, and E. Eskoronsky, "Application of the Fenton and Fenton-Like processes in the landfill leachate tertiary treatment," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 1–8, 2019.

[18] S. Sun, X. Zeng, C. Li, and A. Lemley, "Enhanced heterogeneous and homogeneous Fenton-like degradation of carbamazepine by nano-Fe3O4/H2O2 with nitrilotriacetic acid," *Chemical Engineering Journal*, vol. 244, pp. 44–49, 2014.

[19] E. Neyens and J. Baeyens, "A review of classic Fenton´s peroxidation as an advanced oxidation technique," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 33–50, 2003.

[20] D. Al-Zubaidi and K. Pak, "Degradation parachlorophenol in syntetic wastewater using Batch Electro-Fenton process," *Materials today: Proceedings*, vol. 20, pp. 414–419, 2020.

[21] M. Nalinrut, W. Chen, J. Anotai, and L. Ming-Chun, "Factors affecting degradation of o - toluidine by Fenton process," *Sustainable Enviroment Research*, vol. 21, no. 2, pp. 101–107, 2011.

[22] A. Trovó, T. Silva, O. Gomes, A. Machado, W. Borge, P. Muller, and D. Daniel, "Degradation of caffeine by photo-Fenton process: Optimization of treatment conditions using experimental desing," *Chemosphere*, vol. 90, pp. 170–175, 2013.

[23] W. Gernjak, S. Malato, M. Maldonado, and M. Fuerhacker, *Solar photo-Fenton treatment of EU priority Substances-process parameters and control strategies*. Madrid: Ed. Ciemat, 2006.

[24] G. Quille y T. Donaires, "Tratamiento de efluentes líquidos y sólidos del camal municipal de Ilave," *Revista Investigaciones Altoandinas*, vol. 15, no. 1, pp. 65–72, 2013.

[25] C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, 2nd ed. Limusa Wiley S.A. de C.V., 2004.

[26] P. Nakhate, H. Patil, and K. Marathe, "Intensification of landfill leachate treatment by advanced Fenton process using classical and statistical approach," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 133, pp. 148–159, 2018.

[27] D. Gümüs and F. Akbal, "Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of phenol," *Process Safety and Enviromental Protection*, vol. 103 parte A, pp. 252–258, 2016.

[28] S. Giray, M. Hakan, S. Akarsu, C. Ayhan, and M. Dolaz, "Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater," *Sustainable Enviroment Research*, vol. 28, no. 4, pp. 165–170, 2018.

[29] J. Xu, Y. Long, D. Shen, H. Feng, and T. Chen, "Optimization of Fenton treatment process for degradation of refractory organics in pre-coagulated

leachate membrane concentrates," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 323, pp. 674–680, 2016.

[30] N. Cintra, L. Barroso, G. Goncalves, S. Fleury, M. Soares, G. Rodríguez, and R. Neves, "Removal of azo dye using Fenton and Fenton-like processes: Evaluation of process factors by Box–Behnken design and ecotoxicity tests," *Chemico-Biological Interactions*, vol. 291, pp. 47–54, 2018.

[31] D. Hermosilla, M. Cortijo, and C. Pao, "Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes," *Science of the Total Enviroment*, vol. 407, pp. 3473–3481, 2009.

[32] P. Castro y J. Duran, "Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada," *Tecnología en Marcha*, vol. 27, no. 2, pp. 40–50, 2014.

[33] W. Zhang, H. Wang, and F. Wang, "Promotion of H_2O_2 descomposition activity over β-MnO_2 nanorod catalysts," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 304, pp. 60–66, 2007.

[34] J. Blanco, "Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y foto-Fenton," Tesis de Master, Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2009.

[35] L. Cabrera, S. Caldas, S. Rodrigues, A. Bianchini, F. Duarte, and E. Primel, "Degradation of herbicide diuron in water employing the Fe^0/H_2O_2 system," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 21, no. 12, pp. 2347–2352, 2010.

[36] P. Ghosh, A. Samanta, and S. Ray, "COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton´s oxidation. ," *The Canadian Journal of chemical Enginnering*, vol. 88, no. 6, pp. 1021–1026, 2010.

[37] H. Ibarra, I. Drobosz, y M. Á. Gómez, "Optimización Multiobjetivo del proceso Fenton en el Tratamiento de Aguas Residuales provenientes de la Producción de Café Soluble," *Información Tecnológica*, vol. 29, no. 5, pp. 111–122, 2018.

Using Agent Base Model for managing the critical situation of groundwater resources and aquifer balancing (Case study: Iran-Qazvin Plain Aquifer)

Hamid Rahmani [a], Ali saremi *,[a], Shahab Araghinejad [b], Hossain Babazadeh [a]

[a]*Department of Agriculture Sciences and Food Industry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[b]*Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran*

Abstract.- The main purpose was to reduce the evacuation of aquifers in the Qazvin plain and then to compensate for the deficit of the cumulative reservoir and remove the annual reservoir deficit, no reduction in the revenue of farmers, and similarly to prevent the reduction of crop production. The model was developed and calibrated. In the following, the desired scenarios were implemented by the model. After providing the raw output of the model, these outputs were processed and prioritized based on the results extracted from the desired scenarios. This study applied objected-oriented modeling and Matlab software, which had a high potential in working with large amounts of data. Based on the model, output, and analysis of the results, the best scenario in the first stage was removing the unauthorized wells and preventing the excessive withdrawal of authorize wells. But, as these measures would be countered with farmers' resistance, there should be other measures such as increasing the guaranteed purchase price of products and increasing irrigation efficiency in order to prevent a sharp decline in their revenue and consequently to achieve a result.

Keywords: Agent Base Model (ABM); balancing; groundwater.

Uso del modelo basado en agentes para gestionar la situación crítica de los recursos de aguas subterráneas y el equilibrio de los acuíferos (Estudio de caso: Acuífero de la llanura Irán-Qazvin)

Resumen.- El objetivo principal de la investigación fue reducir la evacuación de los acuíferos en la llanura de Qazvin, luego compensar el déficit del reservorio acumulativo y eliminar el déficit anual del reservorio, sin reducir los ingresos de los agricultores y de manera similar para evitar la reducción de la producción agrícola. El modelo fue desarrollado y calibrado, y a través de éste fueron implementados los escenarios deseados. Después del procesamiento a través del modelo y de obtener resultados crudos, estos se procesaron y priorizaron en base a los resultados extraídos de los escenarios deseados. Este estudio aplicó modelado orientado a objetos y el software Matlab, que tiene un gran potencial para trabajar con grandes cantidades de datos. Basado en el modelo, salida y análisis de los resultados, el mejor escenario en la primera etapa fue la remoción de pozos no autorizados y la prevención del retiro excesivo de los autorizados. Pero, dado que estas medidas se contrarrestarían con la resistencia de los agricultores, debería haber otras recomendaciones como aumentar el precio de compra garantizado de los productos y aumento de la eficiencia del riego para evitar una fuerte caída de sus ingresos y consecuentemente lograr un resultado.

Palabras clave: Modelo basado en agentes (MBA); equilibrio; agua subterránea.

Received: May 11, 2020.
Accepted: June 24, 2020.

1. Introduction

Groundwater resources over-exploitation in Iran leads to a reduction in the volume of water stored in aquifers, reduction in groundwater quality, the striking the especially in the desert and coastal aquifers, saltwater fronts, subsidence, seams, cracks, sinkhole, damage to infrastructure

* Correspondence author:
*e-mail:*a-saremi@srbiau.ac.ir (Ali saremi)

facilities and in important plains of the country and an increase in the deepening and moving the wells. Consequently, under the influence of the condensation of the aquifers and the destruction of the porosity, even in case of rainfall, there is no possibility for water penetration and storage in the aquifers. The total level of Iran is grouped into 609 study areas concerning the catchment area. According to the Water Resources Management (WRM) organization, a sharp decline in groundwater levels and the aquifers' reservoir deficit resulted in banning the 420 of the above 609 regions based on rules to expand the exploitation of groundwater resources [1].

The ABM approach is an appropriate tool for modeling complex systems and phenomena in which the behavior of people or institutions is significant. In this modeling approach are modeled the actors (agents) and their behaviors concerning themselves and their environment. They are used to measure the effectiveness of the behavior of different actors in the system and their interaction with their environment on the overall behavior of the system. The potential features of the ABM approach for facilitating the participation process and improving its quality were of utmost discussion in the water resources management in recent years [2].

ABM approaches, by use of simulating the consequences of people's behavior, can be considered as a remarkable help in the conventional analytical approaches for investigating environmental problems [3] and presenting the visual framework for studying social and ecological variables [4]. Considering two social and ecological dimensions or the users and the water resources system, this model makes it possible to deal with water resources management issues with more realistic and take action in stabilizing water resources. In ABMs, the participation of authorities is regarded as a vital element [5]. The bottom-up approach applied by ABM was critical in investigating the socio-environmental systems [6, 7]. This computational model was used for simulation and adopted from the research fields of artificial intelligence and cellular automata [8].

However, the interaction between environmental and social variables in the ABM might be greatly simplified [9]. The interaction between agents was usually considered based on time and environmental and social variables [10]. A combination of social and natural science methods was needed to properly study the dynamics of social and environmental subsystems and examine environmental and social variables [11, 12]. A comprehensive study of the complexity of environmental, social, and economic systems might be required an interdisciplinary approach [13]. Many studies were conducted on the relationship between physical models of environmental systems and simulations based on social process factors. Some of those studies were conducted by [14, 15].

ABM techniques had a person-centered approach in which each user had their own behavioral rules. Each user could make a change in the behavior regarding the information received from other users and the environment. Moreover, users did not need to share the whole information with others [16]. The limitation of the ABM model was that its forecast was always conditional, depending on the conditions set forth in the model. In [17] allowed the possibility of decision-making concerning dynamic behaviors of agents interacting with each other and their environment [18, 19]. The ABM was able to simulate the human decision-making process by specifying the behavior of the agents.

The ABM is a decision-making support tool and could offer water resources protection measures by various scenarios and assumptions [20]. The application of ABM approach in the water resources management was begun from one decade ago and became a popular topic in the analysis of natural-human systems [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

The opinions should be cautiously designed to increase the value-added result using ABM in land and water management [31]. The ABM was applied to forecast the urbane household water demand in Beijing in 2020 [32]. Furthermore, this model simulated urban water dynamics [33]. Nouri [34] attempted to simulate the rules of the system in the form of mathematical relations concerning the

interaction between agents such as the environment and agriculture.

The ABM approach was observed in the different areas such as archeology, biology, economics, environment, electricity market analysis, financial analysis, social sciences, transportation system and water management system [35, 36, 37].

Lately, ABM models were offered as a proper factor in terms of describing the processes of using innovation in the area of energy and electronic resources [38, 39] and known as a popular tool in the scientific community to manage the problems raised by the natural human system [40].

ABM models were taken into consideration as a powerful tool for modeling complex systems [41]. Applying this approach facilitated the consideration of two general social and ecological sectors as well as their mutual influences. The social sector in this approach encompassed all users or actors who were under the influence of the system and also affected the system. The ecological sector in this approach consisted of all of the sub-models that formed water resources and their related systems. Nothing limited the definition of the social and ecological sector and the relationships between them in the modeling approaches. The only weakness and restrictions were observed in the data and field information. The most remarkable strength of this modeling approach was observing the social sector in the model along with ecological sector as well as regarding their relations and interactions [42]. Actually, the principal idea of this approach was to close the model to the real situation of the problem as much as possible and consequently obtain more realistic results from the model. This was way the use of ABM modeling was significantly increased in the field of modeling the complex systems, especially complex water resources systems [21].

ABM modeling and its use in water resource systems between them and the environment and the communications of the set of agents located in it formed the components of an ABM. Moreover, agents interacted with their environment [36]. Then, it was possible to illustrate individuals, organizations, and their activity environments as multi-agent systems (MAS) and utilize ABM approach.

The unsuitable condition of groundwater resources in Iran, resulted by incorrect management, excessive aquifer withdrawal in Iran and successive droughts, led to numerous problems including subsidence, water salinization, increasing the depth of water table and consequently increasing the required energy consumption for water extraction and social consequences such as forced migration from motherland and suburbs in large cities. Different strategies were proposed by the authorities to therapy this matter, but it must be in such a way to entail maximum effectiveness and have minimum consequences. The ABM was a modern model considered for problem-solving, used in examining the proposed scenarios by observing all limitations and weaknesses and strengths. Through ABM, it could be select the best scenario to solve the problem of groundwater. This study selected Qazvin plain as a pilot, which was located in central regions of Iran, and its agriculture was highly dependent on groundwater resources.

2. Materials and Methods

Using the ABM was increasing for modeling different systems, especially complex socio-ecological systems of water resources. Since the agricultural sector was known as the largest consumer of surface and groundwater resources, the collection of farmers and their withdrawal of water resources were highly remarked in the conducted papers. To this end, were developed some models in order to contribute the decision-makers and users in making better decisions on their policies and cultivation patterns, profitability, resource exploitation, and sustainability. The adaptable policies in the water resources systems were categorized into three different groups [43]. The first group was technical tools to control water consumption. The use or development of the use of modern irrigation systems as well as installing the flow-meters on agricultural wells and their application were among the policies of the first group. The second group encompassed economic tools. Water pricing, tax, withdrawal fines, and the water market were among the policies embedded

in the second category [26]. Finally, the third category dealt with non-economic policies, such as rules of access to water, water quotas and exploitation training [26, 44, 45, 46].

However, all policies apparently could be conductive in controlling the extraction and stabilization of water resources. In reality, there might be no necessary sanction for all of them due to the significant effect of the social sector or the users. Often, the characteristics and behaviors of water resources exploiters were in such a way that some policies would not meet their expectations. Then, these policies did not signify the sustainability of resources and also led to the destruction of water resources. It could be possible to detect the superior policies in the field of water resource management through ABM with more realism and under the conditions of the study area. For example, Feuillette [43], using their developed ABM, concluded that the condition in the area under the study was in a manner that not only subsidizing farmers for changing the irrigation system did not reduce the water resources withdrawal, but also provided the condition for cultivating more lands and hence more exploitation of water resources. Doubtlessly, the most challenging part of ABM was related to the designing part of agent behaviors. Certainly, the best kind of validation could be a combination of quantitative and qualitative methods [42].

2.1. *Groundwater system simulation*

The major environmental indicator was the groundwater resources and aquifer of the region. Concerning the fact that the goal was to balance the aquifer, the effect of the taken measures must be evident in the water table changes. Bear [47] conducted the groundwater flow equation in transition mode as follows in equation (1):

$$\nabla.(K\nabla h) = S\frac{\partial h}{\partial t} \pm Q \qquad (1)$$

In this equation ∇ was the hydraulic slope, K was hydraulic conductivity, h was the height of the piezometric level, Q was the depletion rate from the aquifer, and S was the coefficient of the storage. In this study, a groundwater model named Modflow was examined and applied to investigate changes in the piezometric surface of the aquifer in the region. This model was implemented over and over, and the decisions were made considering its outputs on the impact of different scenarios implementation. In this model, farmers were observed as those who had groundwater rights. Also, environmental right, as a portion of the environment from groundwater resources, was seen as farmers' right and should be retained. With the help of Modflow model under various conditions, the allocated portion was given to the farmers in different scenarios. This interaction between humans and the environment was supposed to eventuate in a sustainable development pattern.

2.2. *Simulation of Agricultural Agent Behavior*

The farmers had a tendency towards taking maximum exploitation of water resources and having maximum possible revenue from their agricultural land. So, they resisted water withdrawal restrictions. They were reluctant to pay for the flow-meter to purchase or install and attempted to demolish and manipulate it in such a way to disable the measurement. If the flow-meter was paid, they would protect it. Farmers who were properly justified and were well-cultured and well-informed were less resistant to flow-meter installation and showed higher participation. They tended to purchase flow-meters with low-cost and low-interest facilities, but they were reluctant to give a guarantee or guarantor for the facility. If there were no other income sources, the farmers used unauthorized wells and were strongly resistant to filling wells. In cases where a large number of exploiters owned the well, this resistance was much higher, and sometimes it was impossible to fill the well. Simulation of agent behavior principle might be examined based on the considered limitations and existing rules through behavioral optimization and functional models [21]. One of the best models applied in the ABM and used in the present study was socioeconomic optimization models to maximize agent profitability [48]. On this basis, the objective function for maximizing revenue resulted by sales of agricultural products and

concerning the physical and behavioral constraints was as follows in equations (2) and (3):

$$\max T_{t,i} = \mathrm{In}_{t,i} = \sum_{i=1}^{n} Pr_{t,i,j} \cdot P_{t,j} \forall i \qquad (2)$$

$$Pr_{i,j} = f_{i,j}\left(A_{i,j}, W_{i,j}\right) \qquad (3)$$

In this equation, $T_{t,i}$ was the value of the objective agricultural function of the agent i during the time period of t, $In_{t,i}$ was the amount of revenue of the farmer during the time period of t (in dollars), $Pr_{t,i,j}$ was the production volume of agent i during the time period of t from j product (in ton), $P_{t,j}$ was the cost of producing product j during the time period of t (in millions of dollars per ton), $f_{i,j}$ was the objective function of the agent i for product j, $A_{i,j}$ was the area under cultivation of the agent i from the product j (in hectare). $W_{i,j}$ was the water volume used by agent i for producing product j (in 1,000 m^3 per hectare), and n indicated the number of product types. With the aim of determining the revenue resulted by agricultural production, it should be mentioned that the price of products changed based on different times and relied on the production rate by other farmers and the time of product supply. A regression model, proposed by [49], could be applied to forecast the price of the products.

$$P_t = AQ_t + B \qquad (4)$$

In equation (4), P_t was the cost, and Q_t was the production volume during the time period of t.

Farmers confronted with two main limitations on crop production, one of them was the permissible water volume for exploitation, and the other was the land area they owned. These limitations were cleared in the equations (5) and (6).

$$\sum_{j=1}^{n} \left(A_{i,j} \cdot W_{i,j}\right) \leq W_{iG} \qquad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{n} A_{i,j} \leq A_t \qquad (6)$$

In this equation, $A_{i,j}$ was the area under cultivation of product j by agent i and $W_{i,j}$ was the water volume used by agent i for product j. A_t was the maximum permissible area for cultivation by agent i.

2.3. *Bargaining Model*

Nash [50] introduced the following nonlinear optimization model with the aim of ensuring the fair allocation of resources by bargaining, by the equation (7).

$$\Omega = \max \prod_{j=1}^{n} \left(x_j - d_j\right) \qquad (7)$$

Restrictions on resource availability:

$$\sum_{j=1}^{n} x_j \leq S$$

Restrictions on individual rationality:

$$x_j \geq d_j$$
$$d_j \geq 0, X_j$$

In the equation (7), Ω was the optimum solution. S, x_j, and d_j were total available and existing resources, shareholders' share of cooperation in the use of resources, and shareholders' share of resources in separate measurements (non-cooperation), respectively. j declared the participation of each shareholder and $(x_j - d_j)$ was the benefit for shareholder j from the cooperation [51, 52].

Among the Pareto optimal set, obtained from the optimization model, Nash's bargaining model was used to select a fair design of water allocation to the agents. The bargaining model found coordination between conflicting shareholders. This model developed a three-member bargain process among shareholders: Representatives, the executive sector of government, and environmental protection agencies. However, the solutions from this model indicated that shareholders considered their preferences, but they did not find the interaction between the agents and reacted with management.

2.4. *Simulation of Government Behavior*

The government played a role in action in the form of two ministries of energy and agriculture. The government was required to

monitor and take appropriate measures to balance the country's aquifers. Monitoring measures were closing unauthorized wells, preventing overdraw of authorize wells, and implementing modern irrigation methods and the other cases. In any event, the government should reduce the yield from the aquifer and increase the water table and reduce the reservoir deficit.

The Gini coefficient was observed in economics as an indicator to represent economic inequality. Recently, this coefficient was utilized to address the fair use of water resources [24]. This coefficient was a numerical coefficient between zero and one. The number zero showed complete equality, but an increase in this number led to greater inequality. The Gini coefficient applied the "mean relative difference". The equation (8) presented the fair distribution and a maximum and minimum withdrawal limitation for each agent. Regarding the equal value for each of the exploitation wells, this equation attempted to minimize the mean relative difference of groundwater resources allocated to farmers.

$$Min\ G = \frac{1}{12N^2\overline{Q}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} |Q_i - Q_j| \qquad (8)$$

$$Qmin \leq Q_i \leq Qmax, i$$

In the equation (8), Q_j, Q_i, Q_{max}, Q_{min}, i, and $\overline{Q}$ were the determined water value for well$_{i,j}$, water maximum and minimum related to each area, and the mean water determined for each well.

3. Study area

The study area was Qazvin with 7347 km^2 and located in the longitude of 80'and 49'to 41 and 59 degrees east and latitude of 19'and 35'to 30 and 36 degrees north in Qazvin province. Figure 1 revealed the location of Qazvin study area. The value of groundwater withdrawal, from 8471 wells, was equal to $1{,}74 \times 10^9$ m^3/yr (1,74 billion m^3 per year), 95 % of which was through agricultural wells. The status of unauthorized and authorize wells in that plain was presented in Table 1. The annual reservoir deficit of Qazvin plain in 2020 was about 160 billion m^3. The cumulative reservoir deficit of this aquifer was about 8663 billion m^3. The volume of excessive withdrawal of authorize wells and the depletion volume of unauthorized wells was 983,37 billion m^3, 514,55 billion m^3, respectively, and total depletion volume from the aquifer was equal to 1497,92 billion m^3.

The main disruptive factors in the balance between income and outcome agents of aquifers were depletion of aquifers by unauthorized wells and excessive withdrawal by wells with exploitation license, so-called overdraw.

The mean of annual reservoir volume deficit and cumulative reservoir volume deficit of the mentioned plain from 1995 to 2019 was 160 billion m^3 and 8663 billion m^3, respectively.

Figure 2 exhibited the hydrograph of Qazvin plain. Obviously, in this hydrograph, the water table of Qazvin aquifer was diminished by 31 m from 1995 to 2019, which was declined on an average of 1 m annually. As observed in this diagram, the current meter installation process, started from 2015, had not a significant effect on improving the status of the water table drop, and it was required to take a step in tackling the existing situation.

Table2 was subjected to types of products that were mostly cultivated in the area and the area and percentage of cultivation of each product. As it was cleared, the majority of agricultural items were wheat, alfalfa, and corn, and most of the garden items were grapes, pistachios, and walnuts.

3.1. Agent-based approach

The ABM approach was considered as a promising tool in order to find scientific and practical management strategies, seeking competitive interests of water resource consumers [53]. Including human characters into decision-making in an ABM and its consequences was a complicated, controversial affair [54]. Predicting numerous factors was as a result of the reaction of difficult and often impossible factors [55].

The ABM steps involved identifying the various available and effective agents, the environment in which the agents interact, the behavioral characteristics of the agents, the manner of reacting agents with each other and the environment, and

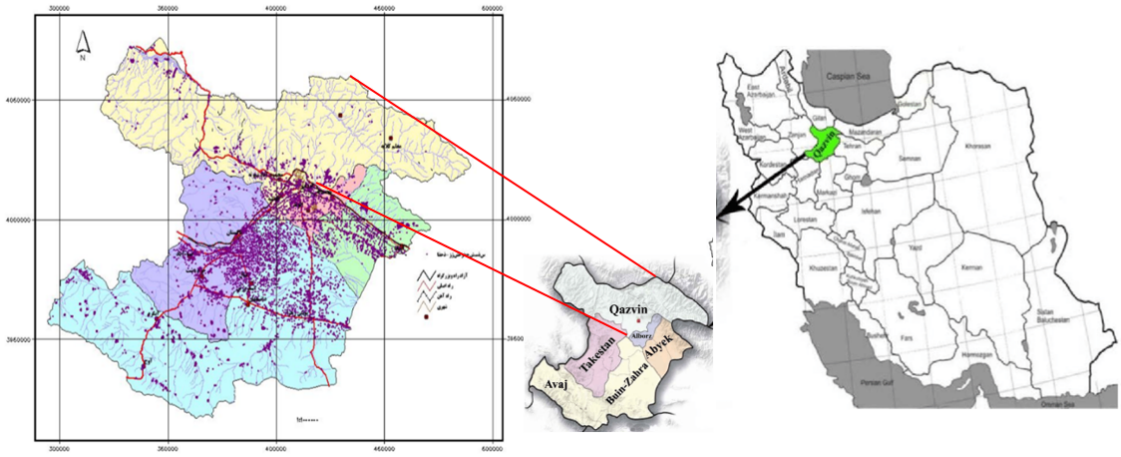


Figure 1: Qazvin study area location map

Table 1: Status of exploitation wells in Qazvin plain [1]

Kind of well	Agriculture		Drinking		Industry and other services		Total	
	Number	Depletion (mcm)	Number	Depletion (mcm)	Number	Depletion (mcm)	Number	Depletion (mcm)
authorized	2671	983.37	490	134	2231	93.2	5392	1210.6
unauthorized	2890	514.55	40	7.92	149	6.68	3079	529.15
total	5561	1497.92	530	141.92	2380	99.88	8471	11739.7

Table 2: Combination of agricultural products cultivation in Qazvin plain

The main type of use	Product type	Water need for cultivation (m^3/yr)	Cultivation (%)	Area (ha)
Garden	Grapes	10000	59	22227
	Pistachios	14500	6.5	2449
	Walnuts	17000	9.5	3579
	Other	15500	25	9418
	Total	—-	100	37673
Agriculture	Wheat	8000	35.4	46899
	Alfalfa	17000	24	28548
	Corn	12000	12.2	16163
	Other	10000	28.4	40873
	Total	—-	100	132483

ultimately implementing the model in the software environment [36].

Based on the conducted studies, the main agents could be divided into three groups: government (including the Ministry of Energy and the Ministry of Agriculture), exploiters, and the environment. The relationship between these agents was revealed in Figure 3.

These examinations were carried out in the form of questionnaires developed by farmers, informants and local authority's reports prepared by the region by consulting and information engineering companies and statistics collected from Qazvin Regional Water Company, Iran Water Resources Management Company, ministry of energy, and the negotiations with experts from the ministry of agriculture based on the BDI method. On this basis, concerning the critical situation of

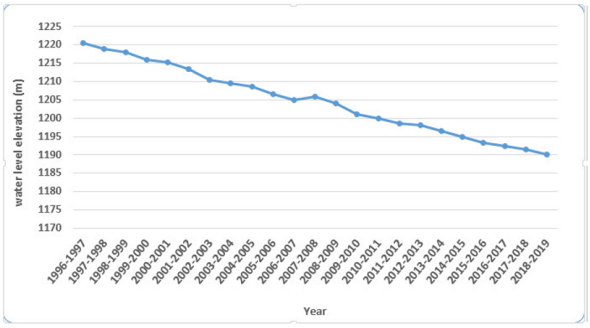


Figure 2: Qazvin plain hydrograph [1]

the Qazvin plain aquifer, the government was aimed at removing the unauthorized withdrawal and reducing the authorize withdrawal to 75 % of renewable groundwater to extract and reduce the aquifer depletion through performing "groundwater revitalization and balancing plan". To this end, authorize withdrawal limit was determined after preparing the groundwater balance and calculating the value of feeding and the aquifer depletion. However, based on international indices such as the Falcon Mark index, if more than 40 % of the volume of renewable water was used, the area would be involved in the water stress. But, since more than 100 % renewable water was currently used, the yields would be dropped up to 75 %. This measure resulted in water stress for agricultural consumers, who were the most groundwater consumers, and the farmers had to fallow some parts of their land. Farmers were also very sensitive to each other's behavior and were affected by each other's behavior. Clearly, if some farmers in the area conducted unauthorized exploitation, others would be tended to do the same. If some of them spontaneously save water, it would leave a positive impact on the behavior of other farmers. The ministry of agriculture lessened the pressure on the farmers by financial support for the implementation of new irrigation methods, such as pressurized irrigation and cropping pattern modification. On the other hand, with the increasing the guaranteed purchase price of agricultural products, it was attempted to compensate part of loss in farmers' revenue. In spite of all the government measures for minimizing withdrawals and preventing unauthorized withdrawals, some exploiters kept increasing their withdrawals from the aquifer. The government imposed fines on those who had unauthorized exploitation and increased the price of water.

In the present study, Matlab software was applied in order to model the agent behavior and prepare ABM as Figure 4. Matlab software had high capability and speed in working with huge software. After determining the mathematical equations of each agent, they were implemented in the software environment, and then the appropriate scenario was selected after several implementations of the model based on different scenarios.

3.2. Scenario Planning

The main purposes of this research were reducing depletion from the Qazvin plain aquifer and thus compensating for the deficit of the cumulative reservoir and removing the annual reservoir deficit and not significantly cutting the revenue of farmers in the area. The policies were seen into two incentives and punitive groups. Incentive groups included increasing irrigation efficiency, cropping pattern modification, and optimum cropping development and increasing the guaranteed purchase price of agricultural products. On the other hand, the punitive group included blocking unauthorized wells, preventing overdraw of authorize wells, reducing the authorize wells withdrawal, modifying their exploitation licenses, and increasing the price of agricultural water.

3.3. The Desired Scenarios

Based on the developed aims and policies for achieving a balanced aquifer, 5 scenarios presented in Table 3 could be taken into considerations. Then the best scenario was selected using ABM after implementing the model and optimizing the results.

Given each scenario, the conceptual decision-making model was prepared, and Matlab software was utilized to implement the model and select the best scenario and the effective and optimum policy in Qazvin plain.

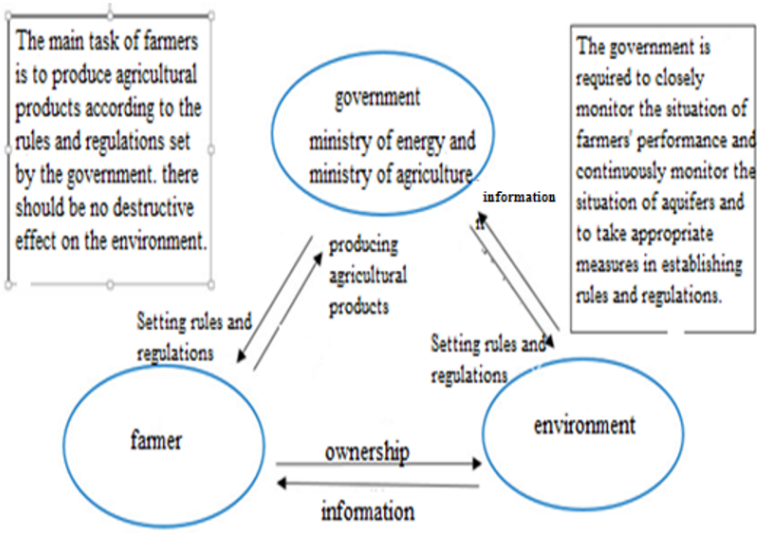


Figure 3: Conceptual model of communication between three main agents

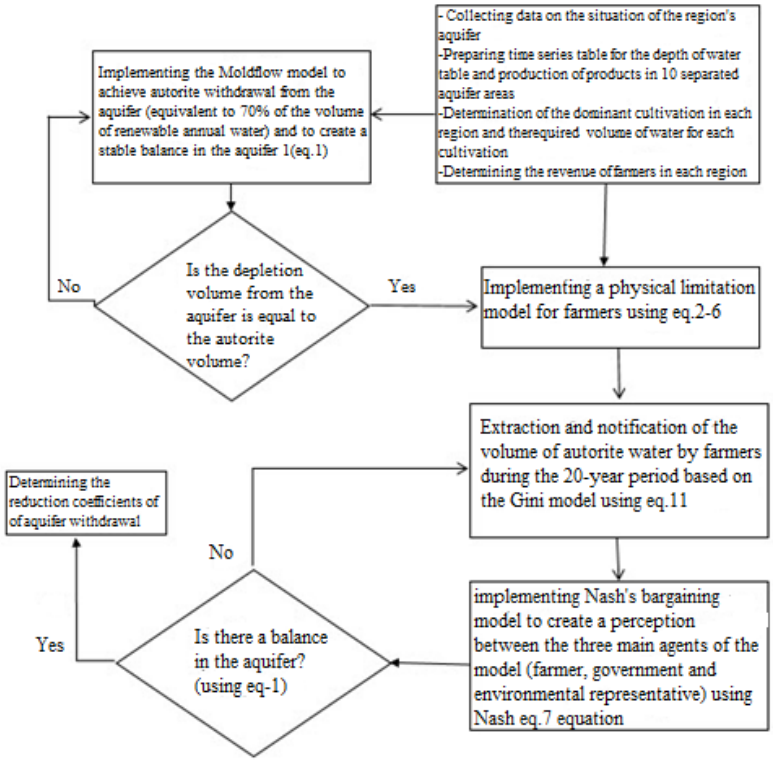


Figure 4: Stages of developing the ABM

4. Results and Discussion

In Table 3, 5 scenarios were observed, aiming at preventing unauthorized exploitation, increasing irrigation efficiency, receiving water price and overdraw fines, increasing the purchase price of products, and reducing the depletion of unauthorized wells. The output of the ABM for each of the above scenarios was presented in Figure 5.

Annual reservoir deficit and cumulative reservoir deficit of Qazvin plain were equal to 160 billion m^3 and 8663 billion m^3, respectively. The objective of implementing these scenarios was to

Table 3: Management scenarios to consider in the developed model

	Scenario				
	1	2	3	4	5
Preventing unauthorized exploitation	✓	—	✓	✓	✓
Increasing irrigation efficiency	✓	✓	—	✓	✓
Receiving water price and overdraw penalty	—	✓	—	✓	✓
Increasing the purchase price of products	—	✓	—	✓	✓
Reducing the depletion of autorite wells	—	—	✓	—	✓

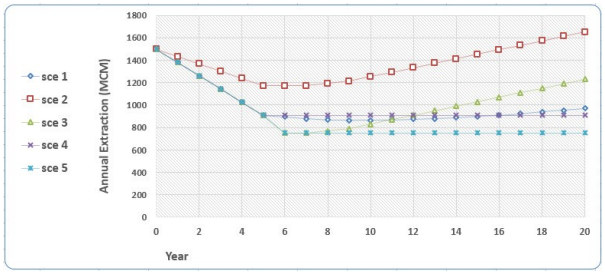


Figure 5: Output parameters variations: Total annual extraction in different scenarios

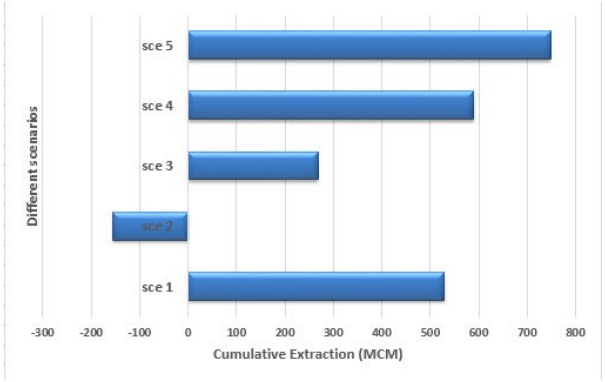


Figure 6: Total cumulative extraction; in different scenarios

drop the annual reservoir deficit to zero in the short term (maximum 5 years) and to compensate for the cumulative reservoir deficit in the long term (20 years). It was attempted in all scenarios to prevent the unauthorized withdrawal in the first five years, to make the aquifer balancing process more meaningful. As observed in Figure 5, the deficit of wells depletion was reduced during the first 5 years by 514 billion m^3 after implementing scenario 1.

This was due to the filling the unauthorized wells and the prevention of overdraw of authorize wells. Then, due to the implementation of pressurized irrigation, the efficiency of irrigation would be enhanced. Still, the depletion volume would be constant due to the development of the area under cultivation. On the other hand, due to the reopening of some unauthorized wells and boring of new unauthorized well, groundwater depletion would increase again. Through interaction strategy and non-prevention of unauthorized withdrawals, which had many social consequences and caused farmers and their families to protest, scenario 2 tended to manage withdrawal of wells by increasing the irrigation efficiency and guaranteed purchase price, but this measure was not hopeful. In the beginning, although it had a slight decrease in the withdrawal, it was continued and resulted in overdraw.

In Scenario 3, at first unauthorized withdrawals were removed, and then, if they did not reach the balancing point, the volume required to comply with the withdrawal limit was decreased from the authorize wells. In this scenario, the depletion of wells was reduced about 549 billion m^3 about 5 years after the start of the plan, but then this value was minimized to 159 billion m^3 to reach the authorize depletion. In this scenario, although the aim of the plan could be met and the deletion of wells could be dropped to the permissible level, it would give rise to unbearable pressure on farmers and caused a lot of resistance. In scenario 4, all measures were observed except for mitigating the withdrawal of authorize wells. In this scenario, there would never be a balance due to unauthorized depletion but would entail relative satisfaction of the exploiters. In Scenario 5, all measures were performed simultaneously. In this scenario, despite the elimination of unauthorized withdrawals to achieve balance, some of the authorize withdrawals were diminished. Still, a portion of farmers' losses was compensated by increasing irrigation efficiency and the purchase price of the products.

Figure 6 displayed the total saved volume by implementing each scenario. Maximum savings were observed in the implementation of scenario

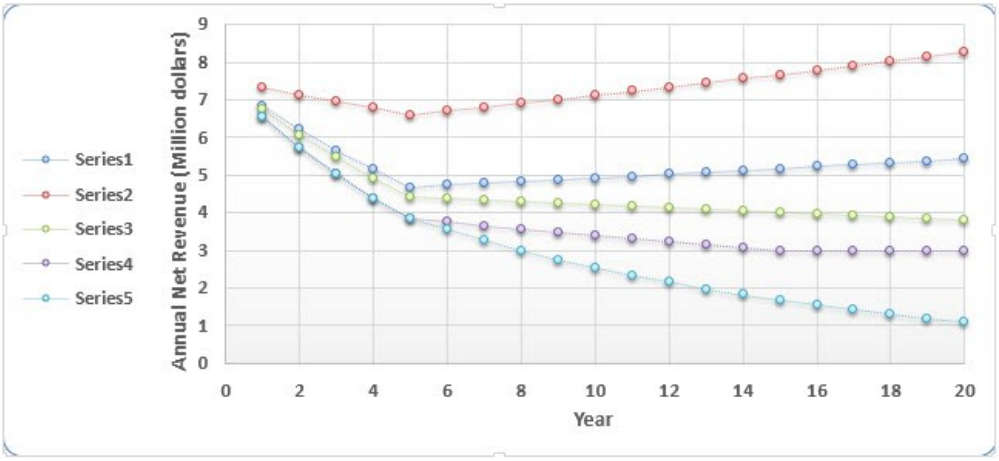
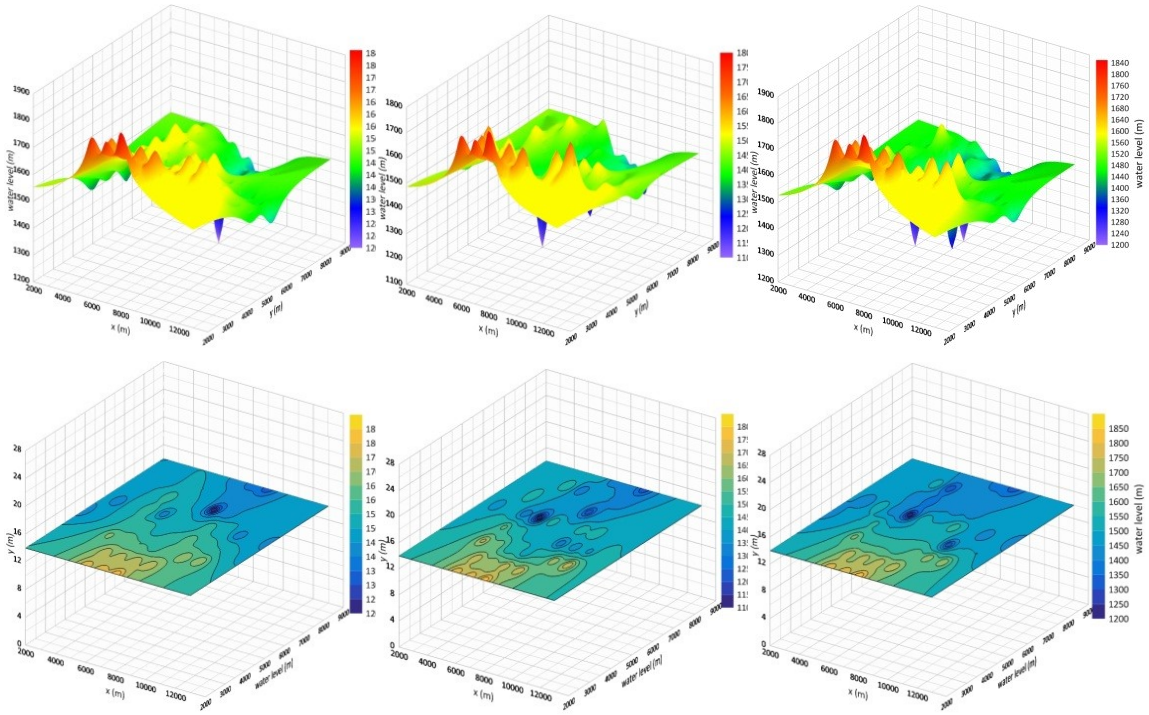


Figure 7: Output total annual net revenue variations in different scenarios



(a) (b) (c)

Figure 8: Changes in the iso-piez map of the study area in two and three-dimensional forms. Images from a to c indicated the effect of reduced groundwater depletion on the region's iso-piez map

5, and an increase in the withdrawal volume from the aquifer was a result of scenario 2.

The output of Figure 7 exhibited that the farmers' revenue reduced due to the implementation of scenarios 3, 4 and 5 in proportion to the volume of withdrawal mitigation from the aquifer. After the implementation of scenario 1, farmers' incomes reduced as the unauthorized withdrawal was prevented for 5 years. But, their revenue increased again due to an increase in irrigation efficiency and the development of the area under cultivation. With respect to non-prevented unauthorized withdrawal in scenario 2, it was observed that the farmers' revenue was slightly minimized due to imposing fines for unauthorized withdrawal and increasing water price during the first few years. However,

their revenue was next increased due to an increase in efficiency and also an increase in the guaranteed purchase price.

To review the impact of the implementation of scenarios on groundwater status, it was studied and compared again 5, 10, and 20 years after implementing the plan in different scenarios. Figure 8 indicated that the height of the water table was increased, and the deficit of the aquifer reservoir was compensated by implementing the best scenarios from a to c.

5. Conclusion

This paper utilized ABM as a method to survey the effective solutions for resolving the groundwater crisis in the Qazvin plain. According to the intended strategies and implemented scenarios, it was tried to prevent an overdraw of authorize wells, which was conducted by installing a smart volumetric meter. This prevention was the most noticeable and effective project in controlling the extraction of groundwater resources. Regarding that there were three important and basic factors in the implementation of this project such as the government (ministry of energy and the ministry of agriculture) and the people (farmers) and the environment and the physical and hydrogeological conditions of the region affected by their performance, the ABM was an efficient and practical method for problem-solving and selecting the best scenario for removing existing challenges and performing a project.

The filling unauthorized wells was significantly emerged in reducing aquifers withdrawal. However, since these two measures would reduce farmers' revenue, a lot of resistance would be created against their takings. Hence, it was required to be conductive in compensating the reduced revenue of farmers by applying the compensatory methods such as increasing irrigation efficiency and implementing new irrigation methods and also increasing the guaranteed purchase price. On the interviews with farmers and government representatives and the prepared questionnaires for this purpose, and the obtained results from the implementation of the model, it was inferred that presenting all-inclusive cooperation was suggested to achieve the goals of the plan and reduce withdrawals from the region's aquifers and consequently reach the balanced aquifer.

The interests of all agents should be clear in the measures, and then unilateral actions would not be satisfactory. Since the farmers were affected by each other, it was so vital to creating conditions in which farmers competed positively for maintaining the aquifer of the plain and stop attempting in more exploitation and achieving an optimum result. In the following, it was recommended to study the effectiveness of other methods on the improvements of the condition of the aquifer such as artificial recharge and watershed management by making use of ABM approach, and then to take action based on results in decision-making on the manner of implementation of each project in different study areas of the country.

Acknowledgment

We, as researchers, would like to extend our gratitude to all those, especially Iran Water Resources Management (WRM) Company and the Qazvin Regional Water Company, who assisted us in conducting this research and the farmers and experts in the region who cooperated with us and provided the required information.

6. References

[1] J. Badham, S. Elsawah, J. H. Guillaume, S. H. Hamilton, R. J. Hunt, A. J. Jakeman, and P. Gober, "Effective modeling for Integrated Water Resource Management: A guide to contextual practices by phases and steps and future opportunities," *Environmental Modelling & Software*, vol. 116, pp. 40–56, 2019.

[2] P. Davidsson, J. Holmgren, H. Kyhlbok, D. Mengistu, and M. Persson, "Applications of Agent Based Simulation," in *Multi-Agent-Based Simulation VII. MABS 2006. Lecture Notes in Computer Science*, L. Antunes and K. Takadama, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, vol. 4442, pp. 15–27.

[3] M. Jaxa-Rozen, J. Kwakkel, and M. Bloemendal, "A coupled simulation architecture for agent-based/geohydrological modelling with NetLogo and MODFLOW," *Environmental Modelling & Software*, vol. 115, pp. 19–37, 2019.

[4] M. Hare and P. Deadman, "Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management," *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, vol. 64, no. 1, pp. 25–40, 2004.

[5] A. Voinov and F. Bousquet, "Modelling with stakeholders," *Environmental Modelling and Software*, vol. 25, no. 11, pp. 1268–1281, 2010.

[6] P. Terna, "Simulation tools for social scientists: Building agent based models with swarm," *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 1998.

[7] E. Ostrom, "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems," *Science*, vol. 325, no. 5939, pp. 419–422, 2009.

[8] M. Moglia, A. Podkalicka, and J. McGregor, "An Agent-Based Model of Residential Energy Efficiency Adoption," *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 21, no. 3, 2018.

[9] T. Filatova, J. Polhill, and S. van Ewijk, "Regime shifts in coupled socio-environmental systems: Review of modelling challenges and approaches," *Environmental Modelling & Software*, vol. 75, pp. 333–347, 2016.

[10] M. Scheffer, S. Carpenter, J. Foley, C. Folke, and B. Walker, "Catastrophic shifts in ecosystems," *Nature*, vol. 413, pp. 591–596, 2001.

[11] T. Filatova, P. Verburg, D. Parker, and C. Stannard, "Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects," *Environmental Modelling & Software*, vol. 45, pp. 1–7, 2013.

[12] A. Voinov and H. Shugart, "'Integronsters', integral and integrated modeling," *Environmental Modelling & Software*, vol. 39, pp. 149–158, 2013.

[13] A. Tavoni and S. Levin, "Managing the climate commons at the nexus of ecology, behaviour and economics," *Nature Climate Change*, vol. 4, no. 12, pp. 1057–1063, 2014.

[14] M. Bithell and J. Brasington, "Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution," *Environmental Modelling & Software*, vol. 24, no. 2, pp. 173–190, 2009.

[15] H. Reeves and M. Zellner, "Linking MODFLOW with an Agent-Based Land-Use Model to Support Decision Making," *Ground Water*, vol. 48, no. 5, pp. 649–660, 2010.

[16] Y. Xiao, L. Fang, and K. Hipel, "Agent-Based Modeling Approach to Investigating the Impact of Water Demand Management," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 144, no. 3, p. 04018006, 2018.

[17] F. Boschetti, N. J. Grigg, and I. Enting, "Modelling = conditional prediction," *Ecological Complexity*, vol. 8, no. 1, pp. 86–91, 2011.

[18] N. Gilbert and K. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, 2nd ed. Buckingham, PA: Open University Press, 2000.

[19] P. Pérez and D. F. Batten, *Complex Science for a Complex World: Exploring Human Ecosystems with Agents*. Canberra: Australian National University Press, 2006.

[20] M. Moglia, S. Cook, and S. Tapsuwan, "Promoting Water Conservation: Where to from here?" *Water*, vol. 10, no. 11, p. 1510, 2018.

[21] E. Z. Berglund, "Using Agent-Based Modeling for Water Resources Planning and Management," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 141, no. 11, p. 04015025, 2015.

[22] M. Giuliani, A. Castelletti, F. Amigoni, and X. Cai, "Multiagent systems and distributed constraint reasoning for regulatorymechanism design in water management," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 141, p. 04014068, 2015.

[23] M. Giuliani and A. Castelletti, "Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources systems byagent-based optimization," *Water Resources Research*, vol. 49, no. 7, pp. 3912–3926, 2013.

[24] Z. Hu, Y. Chen, L. Yao, C. Wei, and C. Li, "Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity–efficiency tradeoff," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 109, pp. 102–113, 2016.

[25] H. F. Khan, Y. C. E. Yang, H. Xie, and C. Ringer, "A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 12, pp. 6275–6288, 2017.

[26] K. Mulligan, C. M. Brown, Y. C. E. Yang, and D. Ahlfeld, "Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling," *Water Resources Research*, vol. 50, no. 3, pp. 2257–2275, 2014.

[27] M. Schlüter, H. Leslie, and S. Levin, "Managing water-use tradeoffs in a semi-arid river delta to sustain multiple ecosystem services: a modeling approach," *Ecological Research*, vol. 24, no. 3, pp. 491–503, 2009.

[28] Y. C. E. Yang, X. Cai, and D. M. Stipanović, "A decentralized optimization algorithm for multi-agent system based watershed management," *Water Resources Research*, vol. 45, no. 8, p. W08430, 2009.

[29] Y. C. E. Yang, J. Zhao, and X. Cai, "Decentralized optimization method for water allocation management in the Yellow River Basin," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 138, no. 4, pp. 313–325, 2012.

[30] E. M. Zechman, "Agent-based modeling to simulate contamination events and evaluate threat management strategies in water distribution systems," *Risk Analysis: An International Journal*, vol. 31, no. 5, pp. 758–772, 2011.

[31] P. Van Oel, D. Mulatu, V. Odongo, D. Willy, and A. Van der Veen, "Using Data on Social Influence and Collective Action for Parameterizing a Geographically-

Explicit Agent-Based Model for the Diffusion of Soil Conservation Efforts," *Environmental Modeling & Assessment*, vol. 24, no. 1, pp. 1–19, 2018.

[32] X. C. Yuan, Y. M. Wei, S. Y. Pan, and J. L. Jin, "Urban Household Water Demand in Beijing by 2020: An Agent-Based Model," *Water Resources Management*, vol. 28, pp. 2967–2980, 2014.

[33] A. Mashhadi Ali, M. Shafiee, and E. Berglund, "Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages," *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, pp. 420–434, 2017.

[34] A. Nouri, B. Saghafian, M. Delavar, and M. Bazargan-Lari, "Agent-Based Modeling for Evaluation of Crop Pattern and Water Management Policies," *Water Resources Management*, vol. 33, no. 11, pp. 3707–3720, 2019.

[35] C. M. Macal, "Everything you need to know about agent-based modelling and simulation," *Journal of Simulation*, vol. 10, no. 2, pp. 144–156, 2016.

[36] C. M. Macal and M. J. North, "Tutorial on agent-based modeling and simulation," *Journal of Simulation*, vol. 4, no. 3, pp. 151–162, 2010.

[37] M. Moglia, P. Perez, and S. Burn, "Modelling an urban water system on the edge of chaos," *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, no. 12, pp. 1528–1538, 2010.

[38] V. Rai and A. D. Henry, "Agent-based modelling of consumer energy choices," *Nature Climate Change*, vol. 6, no. 6, p. 556, 2016.

[39] M. Moglia, S. Cook, and J. McGregor, "A review of agent-based modelling of technology diffusion with special reference to residential energy efficiency," *Sustainable Cities and Society*, vol. 31, pp. 173–182, 2017.

[40] J. Hyun, S. Huang, Y. Yang, V. Tidwell, and J. Macknick, "Using a coupled agent-based modeling approach to analyze the role of risk perception in water management decisions," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 5, pp. 2261–2278, 2019.

[41] S. Levin, T. Xepapadeas, A. S. Crépin, J. Norberg, A. De Zeeuw, C. Folke, T. Hughes, K. Arrow, S. Barrett, G. Daily, P. Ehrlich, N. Kautsky, K. G. Muler, S. Polasky, M. Troell, J. R. Vincent, and B. Walker, "Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications," *Environment and Development Economics* , vol. 18, no. 2, pp. 111–132, 2013.

[42] S. Lotfi and S. Araghinejad, "A review on challenges in application of agent-based models in water resources systems," *Iran Water Resources Research* , vol. 13, no. 2, pp. 115–126, 2017.

[43] S. Feuillette, F. Bousquet, and P. Le Goulven, "SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table," *Environmental Modelling & Software* , vol. 18, no. 5, pp. 413–427, 2003.

[44] J. C. Castilla-Rho, G. Mariethoz, R. Rojas, M. S. Andersen, and B. F. J. Kelly, "An agent-based platform for simulating complex human–aquifer interactions in managed groundwater systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 73, pp. 305–323, 2015.

[45] P. R. Van Oel, M. S. Krol, A. Y. Hoekstra, and R. R. Taddei, "Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach," *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, no. 4, pp. 433–443, 2010.

[46] T. Berger, R. Birner, J. Díaz, N. McCarthy, and H. Wittmer, "Capturing the complexity of water uses and water users within a multi-agent framework," in *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*, E. Craswell, M. Bonnell, D. Bossio, S. Demuth, and N. Van De Giesen, Eds. Dordrecht: Springer, 2006.

[47] J. Bear and A. Verruijt, *Modeling groundwater flow and pollution*. Springer Science & Business Media, 1987, vol. 1.

[48] N. Plummer, M. J. Salinger, N. Nicholls, R. Suppiah, K. J. Hennessy, R. M. Leighton, B. Trewin, C. M. Page, and J. M. Lough, "Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century," *Climatic Change*, vol. 42, pp. 183–202, 1999.

[49] U. Kim and J. J. Kaluarachchi, "Climate Change Impacts on Water Resources in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45, no. 6, pp. 1361–1378, 2009.

[50] J. Nash, "Two-person cooperative games," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, vol. 21, no. 1, pp. 128–140, 1953.

[51] R. Kerachian and M. Karamouz, "A stochastic conflict resolution model for waterquality management in reservoir-river systems," *Advances in Water Resources*, vol. 30, no. 4, pp. 866–882, 2007.

[52] K. Madani and J. R. Lund, "California's Sacramento–San Joaquin delta conflict: from cooperation to chicken," *Journal of water resources planning and management*, vol. 138, no. 2, pp. 90–99, 2012.

[53] M. Akhbari and N. S. Grigg, "Water management trade-offs between agricultureand the environment: a multiobjective approach and application," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 140, no. 8, p. 05014005, 2014.

[54] C. Pahl-Wostl, "Towards sustainability in the water sector – the importanceof human actors and processes of social learning," *Aquatic Sciences*, vol. 64, pp. 394–411, 2002.

[55] M. Akhbari and N. S. Grigg, "Managing water resources conflicts: Modelling behavior in a decision tool," *WaterResources Management*, vol. 29, no. 14, pp. 5201–5216, 2015.

Performance evaluation of hydrological models GR4J, HBV and SOCONT for the forecast of average daily flows in the Ramis river basin, Peru

Efrain Lujano [*,a], Jesús David Sosa [b], Rene Lujano [c], Apolinario Lujano [d],

[a]*Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú*
[b]*Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Lima, Perú*
[c]*Programa de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú*
[d]*Autoridad Nacional del Agua (ANA), Administración Local de Agua Ilave, Puno, Perú.*

Abstract.- Floods are natural phenomena that have occurred throughout history. The frequency with which it occurs has induced significant human losses, losses in agriculture, the socioeconomic system and damage to infrastructure. This phenomenon is likely to become more frequent with climate change. The objective of the research was to evaluate the performance of three hydrological models for the forecast of average daily flows in a basin of the Peruvian altiplano. The data set used are hydrometeorological measurements of total precipitation, average temperature and daily average flows that were used as input to the Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) and Soil Contribution (SOCONT) hydrological models). The simulated discharges were evaluated using statistical techniques of efficiency and error. Satisfactory results are shown in the calibration and validation stage of the HBV, GR4J and SOCONT hydrological models. However, the statistical evaluation also showed that the GR4J model, despite using only four parameters, performs better in the simulation of avenue and drainage, followed by the HBV and SOCONT models. This finding indicates that the models evaluated can be integrated as an alternative for strengthening the daily hydrological forecast in the Ramis basin.

Keywords: Ramis basin; GR4J; HBV; hydrological modeling; RS-MINERVE; SOCONT.

Evaluación del desempeño de modelos hidrológicos GR4J, HBV y SOCONT para el pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, Perú

Resumen.- Las inundaciones son fenómenos naturales que han ocurrido a lo largo de la historia. La frecuencia con la que se presentan ha inducido importantes pérdidas humanas, pérdidas en la agricultura, el sistema socioeconómico y daños a la infraestructura. Probablemente, este fenómeno se vuelva más frecuente con el cambio climático. El objetivo de la investigación fue evaluar el desempeño de tres modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales medios diarios en una cuenca del altiplano peruano. El conjunto de datos utilizados son mediciones hidrometeorológicas de precipitación total, temperatura media y caudales medios diarios que fueron utilizados como insumo de entrada a los modelos hidrológicos Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) y Soil Contribution (SOCONT). Las descargas simuladas fueron evaluadas mediante técnicas estadísticas de eficiencia y error. Resultados satisfactorios, son mostrados en la etapa de calibración y validación de los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT. Sin embargo, la evaluación estadística también mostró que el modelo GR4J a pesar de utilizar solo cuatro parámetros, se desempeña mejor en la simulación de caudales de avenida y estiaje, seguido de los modelos HBV y SOCONT. Este hallazgo indica que los modelos evaluados, puedan ser integrados como una alternativa para el fortalecimiento del pronóstico hidrológico diario en la cuenca Ramis.

Palabras clave: Cuenca Ramis; GR4J; HBV; modelación hidrológica; RS-MINERVE; SOCONT.

Recibido: 08 de junio, 2020. Aceptado: 05 de agosto, 2020.

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*elujano28@gmail.com (E. Lujano)

1. Introducción

Las planicies, son las zonas más propensas a las inundaciones. Estos fenómenos naturales, han ocurrido a lo largo de la historia y la frecuencia con la que se presentan ha ocasionado importantes pérdidas de vidas humanas, en la agricultura, en el sistema socioeconómico y daños a la infraestructura.

Probablemente, este fenómeno se vuelva más frecuente con el cambio climático, y el uso apropiado de modelos para el pronóstico hidrológico contribuyan en minimizar los daños asociados con las inundaciones. El uso de modelos hidrológicos se ha convertido en herramientas esenciales para estudiar la respuesta de los regímenes hidrológicos [1], [2], motivo por el cual, se pueda realizar pronósticos hidrológicos con mayor grado de confianza para la toma de decisiones y mejor aún si se tiene operativo más de un modelo hidrológico.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el pronóstico hidrológico, prevenir las inundaciones y alertar a la población. Los modelos hidrológicos utilizados en el presente trabajo son los de tipo conceptual, entre ellos el HBV [3], que fue aplicado bajo diversas condiciones climatológicas, mostrando resultados satisfactorios y son ejemplificados en [4, 5, 6, 2, 7], el modelo SOCONT (Soil Contribution) también fue estudiado en la predicción de crecidas operativas y la estimación de inundaciones [8, 9, 10, 11] y el modelo GR4J [12] con aplicaciones en la modelación y pronóstico hidrológico en cuencas de Francia y Suiza [13], en cuencas de Perú [14] y el impacto de cambio climático en Iraq [15].

En tal sentido, la modelación hidrológica depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles para el proceso de calibración y validación, asimismo el uso de varios modelos hidrológicos de lluvia escorrentía, permiten disminuir las incertidumbres en la predicción hidrológica. Un rendimiento insatisfactorio podría atribuirse a datos meteorológicos insuficientes junto con una distribución espacial de lluvia muy heterogénea [2].

En la actualidad, existen escasas evidencias en la aplicación de modelos hidrológicos a paso de tiempo diario que puedan dar mayor certidumbre en el pronóstico de caudales en cuencas del altiplano peruano. En este contexto, el principal objetivo de este trabajo, es evaluar el desempeño de tres modelos hidrológicos para el pronóstico de caudales medios diarios en una cuenca del altiplano peruano, con la finalidad de contribuir al fortalecimiento del pronóstico hidrológico.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La zona en la que se realizó este estudio, es la cuenca del río Ramis (14.769,62 km^2), que se extiende desde la estación hidrológica puente Ramis hasta la cordillera oriental en el departamento de Puno, Perú (Figura 1) y es la unidad hidrográfica con mayor aporte de caudales al lago navegable más alto del mundo (Titicaca). Su altitud de la cuenca está comprendida entre 3812 y 5743 ms.n.m., con una pendiente promedio de 22 % y una longitud de río principal de 321 km aproximadamente. Según SENAMHI en su portal oficial (https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru) en la cuenca en estudio se tiene un clima lluvioso – semiseco, con una precipitación promedio anual de 700 mm, los mayores acumulados de lluvia se concentran en verano, mientras que un otoño e invierno seco hacen la diferencia al periodo de estiaje. El tipo de cubertura actual de suelo, según la clasificación anual del programa internacional de geósfera-biosfera (IGBP) disponible en google earth engine (GEE), colección de imagen ID MODIS/006/MCD12Q1 [16], tiene un 0,01 % de cobertura de árboles, 96,86 % de pastizales dominados por plantas herbáceas ($< 2m$), 0,03 % de humedales permanentes, 1,68 % tierras de cultivo, 0,13 % tierras urbanas y urbanizadas, 0,01 % nieve y hielo permanente, 1,25 % áreas áridas y 0,02 % de cuerpos de agua.

2.2. Datos hidrometeorológicos y de terreno

Los datos utilizados se pueden agrupar en aquellos que fueron necesarios para caracterizar lo parámetros morfométricos de la cuenca y los que se utilizaron para la modelación hidrológica.

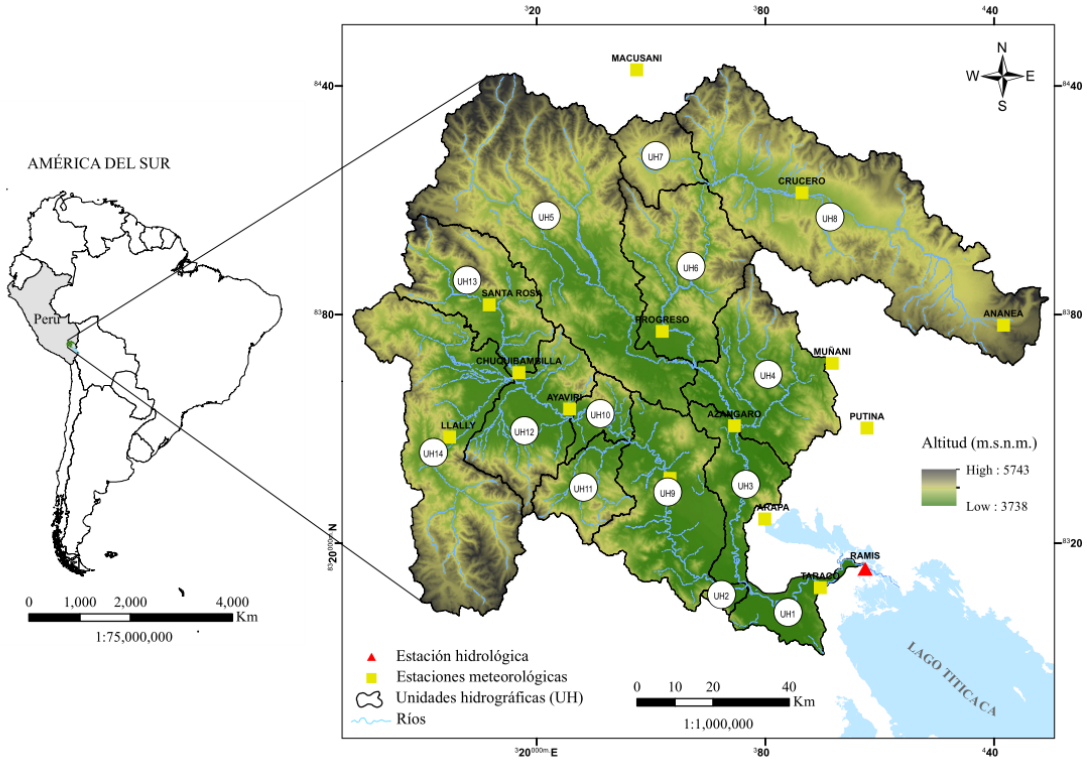


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca Ramis y estaciones hidrometeorológicas

Para caracterizar los parámetros morfométricos, se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) global ASTER (ASTGTM – V002) con resolución espacial de ~30 m, desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón, obtenido del portal (https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/).

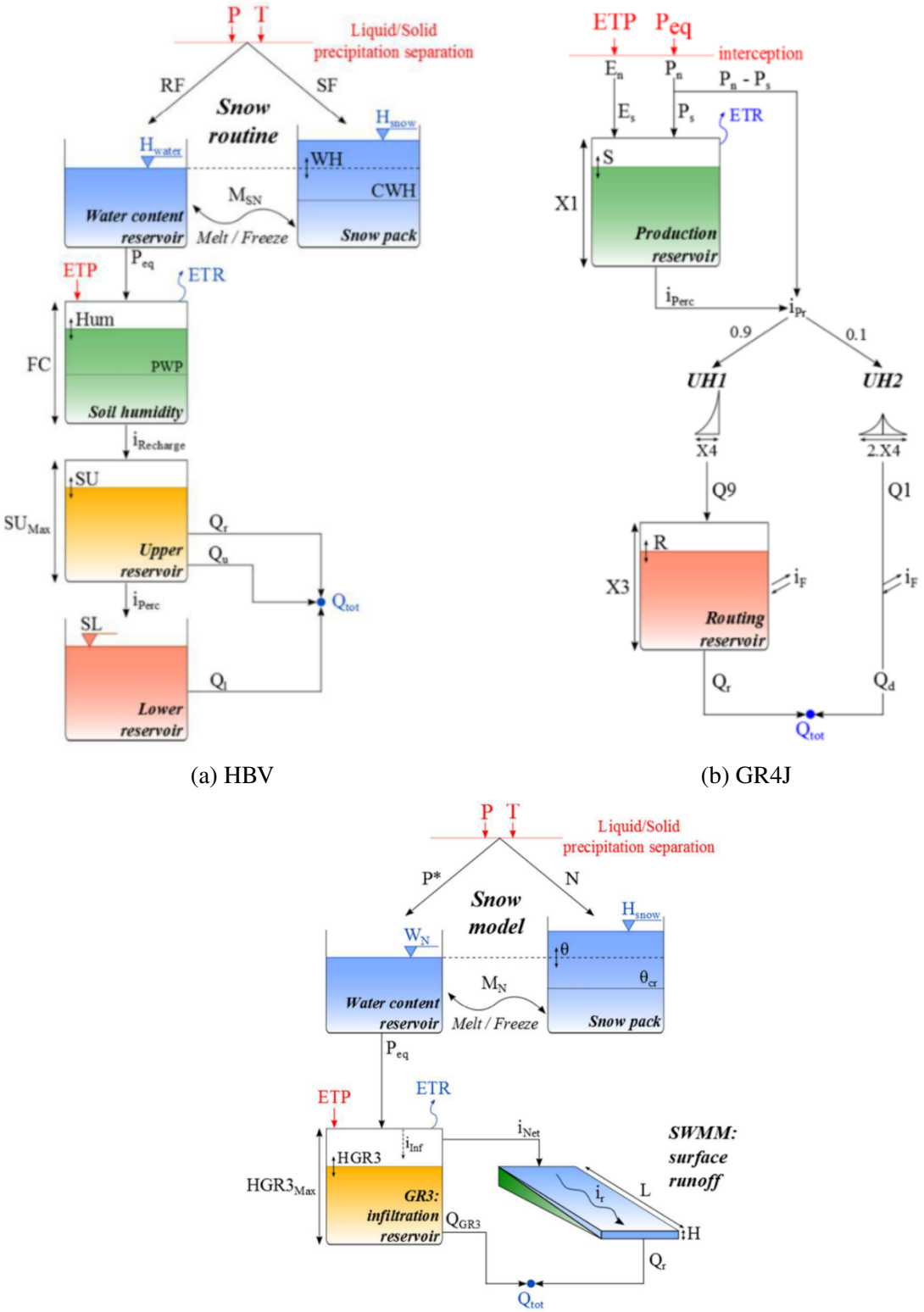
Para la modelación hidrológica, se utilizaron series temporales diarias de precipitación total (mm), temperatura media (°C) y caudales medios (m^3/s). Los registros de 14 estaciones meteorológicas y 01 estación hidrológica, corresponden al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (Figura 1) y cubren el periodo del 01 de septiembre de 2005 al 31 de agosto de 2016.

2.3. Descripción de modelos hidrológicos

Se evaluaron los modelos hidrológicos conceptuales HBV (Figura 2a), GR4J (Figura 2b) y SOCONT (Figura 2c). HBV fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para la simulación de escorrentía y pronóstico hidrológico. La primera ejecución exitosa, con una primera versión del modelo hidrológico HBV, se llevó a cabo en 1972 [3, 17]. Las ideas básicas del modelo son discutidas con mayor detalle por [18].

Un segundo modelo utilizado es el GR4J, que pertenece a la familia de modelos de balance de humedad del suelo de cuatro parámetros [12], las ecuaciones básicas se pueden encontrar con mayor detalle en [19]. Por otro lado, el modelo hidrológico SOCONT, tiene dos niveles de discretización. El primer nivel corresponde a la separación entre la parte cubierta de hielo de la cuenca (cubierta por glaciares o hielo aislados) y la parte no cubierta de hielo [8].

En el esquema del modelo SOCONT (Figura 2c), el modelo Snow-GSM (Glacier Snow Melting) simula la evolución transitoria de la capa de nieve (fusión y acumulación) en función de la temperatura (T) y la precipitación (P), proporcionando así una precipitación equivalente (Peq) que se utiliza como entrada por el modelo GR3 (Génie Rural à 3 paramétres). El modelo GR3 también tiene



(a) HBV (b) GR4J

(c) SOCONT

Figura 2: Estructura de los modelos hidrológicos [19]

en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y proporciona la intensidad neta al modelo SWMM (Storm Water Management Model) [19].

2.4. *Modelación hidrológica*

Antes de realizar la modelación hidrológica, los caudales medios diarios fueron evaluados a través de técnicas cualitativas de control de calidad recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [20] entre ellas, se realizaron representaciones gráficas del hidrograma de niveles y caudales en una misma escala, se identificaron la presencia de líneas rectas continuas, recesiones ascendentes inverosímiles, cambios abruptos, discontinuidades sucesivas, máximos y mínimos aislados, así como la presencia de escalones o picos en el registro. Sin embargo, para los datos diarios de precipitación y temperatura se verificó la coherencia espacial con estaciones vecinas, presencia de truncamiento en los registros y unidades incorrectas. Los valores atípicos para temperatura fueron asociados a los percentiles 10 y 90 mientras que las precipitaciones fueron asociados al percentil 95.

Para determinar los parámetros morfométricos necesarios, se delimitaron las unidades hidrográficas (UH) mediante el uso de sistema de información geográfica (SIG), siendo necesarios el modelo digital de elevación (DEM) y la estación hidrológica puente Ramis. Los parámetros determinados fueron; el área de la cuenca (m^2), las coordenadas (este y norte) y su respectiva altitud (ms.n.m.) del centro de gravedad (x e y). El centro de gravedad de la cuenca fue considerado como la estación virtual para la estimación de la precipitación media a partir de datos existentes de las estaciones meteorológicas. El método de interpolación Shepard [21, 22] permitió estimar las variables medias, considerando un radio mínimo de 40.000 metros. La evapotranspiración potencial (ETP), fue estimada mediante el uso de la metodología propuesta por [23], el cual depende de la radiación solar global media en el suelo (cal/cm^2/día), con un factor de corrección considerado de 0,37 para febrero y 0,40 para el resto de los meses.

La modelación hidrológica se implementó con una serie histórica de caudales diarios observados a través de 11 años (setiembre 2005–agosto 2016). El periodo de calibración, fue considerado aleatoriamente desde el 01 septiembre de 2005 al 31 de agosto 2013 (2922 días) que corresponde al 70 % de la información. La etapa de validación, se consideró desde el 01 de septiembre de 2013 al 31 de agosto 2016 (1096 días) correspondiente al 30 % del total de la información, Rusli [24] indica que la etapa de calibración se realiza para comprender la correlación que existe entre los parámetros del modelo y la respuesta hidrológica de la cuenca y asimismo lograr la mejor concordancia entre los caudales observados y simulados. Los parámetros de los modelos hidrológicos, fueron optimizados mediante calibración automática a través del método de optimización global Shuffled Complex Evolution, University of Arizona (SCE-UA) [25] incorporado en la plataforma RS MINERVE [19]. En la calibración automática, los parámetros se ajustan automáticamente de acuerdo con un esquema de búsqueda especificada y medidas numéricas de bondad de ajuste [1, 26].

2.5. *Métricas de desempeño*

Una primera evaluación del rendimiento de modelos, fue valorado mediante el diagrama de Taylor basado en la ley de los cosenos que proporciona en una sola gráfica la variación simultánea de tres estadísticos: la desviación estándar (DE), el coeficiente de correlación de Pearson (CC) y la raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD). En general, el diagrama de Taylor caracteriza la relación estadística entre dos campos, uno de "prueba" (por lo general representa un modelo simulado) y el otro campo de "referencia", que habitualmente representa un estado observado [27].

También se usaron una variedad de métricas de desempeño para la aceptación de la calidad de los modelos (Tabla 1), así tenemos la función de eficiencia de Nash propuesta por [28] caracterizada por su flexibilidad para evaluar la capacidad predictiva de diversos modelos hidrológicos [29, 30, 8, 31, 32, 33, 34]. Entre otros, el coeficiente adimensional de Nash para valores de logaritmo (Nash-ln) para caudales bajos [30, 8, 35], el coeficiente de correlación de Pearson [33], el coeficiente de Bias Score [36] para evaluar el sesgo y la raíz del error cuadrático medio relativo

RRMSE para medir el error de la capacidad predictiva [37].

Por otro lado, una evaluación cualitativa mediante superposición de hidrogramas y la curva de duración de caudales observados y simulados ayudaron a verificar la consistencia de las descargas simuladas por los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT.

3. Resultados y discusión

El diagrama de Taylor (Figura 3), proporciona un gráfico de posición entre las estimaciones de los modelos y los datos observados de la estación hidrológica. El diagrama resume la relación que existe entre la desviación estándar (DE), el coeficiente de correlación de Pearson (CC) y la raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD). La posición de cada modelo en el diagrama de Taylor (Figura 3a) se encuentra casi cercano a la línea de desviación estándar observada, no en tanto en el diagrama de Taylor (Figura 3b) se aleja de la línea de desviación estándar observada. Se deduce que los modelos HBV, GR4J y SOCONT presentan buenos resultados en la simulación de caudales para la etapa de calibración (Figura 3a) y validación (Figura 3b), aunque el rendimiento disminuye en la etapa de validación, los modelos son capaces de representar adecuadamente los caudales observados en el punto de salida de la cuenca.

En la Tabla 2 se resumen los parámetros calculados en la etapa de calibración de los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT. En el proceso de calibración de parámetros (Tabla 2), en la función objetivo se consideraron 02 criterios estadísticos Nash y Nash-ln, asignándole un mayor valor al coeficiente de Nash. El énfasis está en la inclusión de dos o más medidas de rendimiento para calibración automática del modelo, es decir, multi-objetivo [38]. Para mejorar el rendimiento en el proceso de calibración, se optimizaron también los coeficientes para las estaciones meteorológicas (Tabla 3), entre ellos el coeficiente de corrección multiplicativo para las variables de precipitación (Coeff P) y evapotranspiración (Coeff ETP) y el coeficiente de corrección aditivo para la temperatura (Coeff T). Siendo la calibración, el proceso de modificación de los parámetros de un modelo hasta que la salida del modelo coincide con un conjunto de datos observados [39].

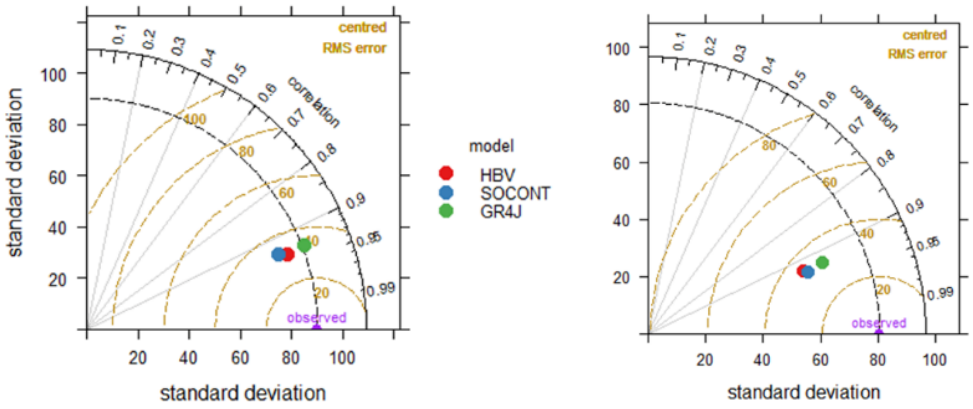
En la Figura 4 la comparación entre el hidrograma observado y simulado por los modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT, para el periodo de calibración y validación muestran valores simulados análogos a los valores observados. Aunque la inspección visual, es una medida subjetiva, nos da una idea de la precisión de los modelos hidrológicos. En la etapa de calibración, las métricas de desempeño (Tabla 4), muestran valores del coeficiente de Nash para los modelos HBV (0,88), GR4J (0,86) y SOCONT (0,86), con un rendimiento muy bueno según los criterios establecidos por [32] y un rendimiento bueno según las discreciones de [34]. Los coeficientes de Nash-ln para caudales bajos es de 0,93 (HBV), 0,92 (GR4J) y 0,86 (SOCONT). Para la simulación de caudales diarios durante el periodo de validación, el coeficiente de eficiencia de Nash baja a 0,80; 0,84 y 0,83 para los modelos HBV, GR4J y SOCONT respectivamente, mientras que Nash-ln muestran patrones similares a los del periodo de calibración con 0,93 y 0,86 para los modelos HBV y SOCONT respectivamente, no en tanto el rendimiento baja para el modelo GR4J (Nash-ln = 0,90). Los resultados en la etapa de validación indican que los modelos son lo suficientemente flexibles para ser utilizados en la simulación de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis y ello es corroborado en caudales simulados fuera del periodo de calibración [40].

Las salidas de los modelos hidrológicos, muestran resultados alentadores y existe una coincidencia similar entre los valores simulados y observados, que sugieren ser incorporados como instrumento en el pronóstico de caudales y la gestión del recurso hídrico.

Una comparación de la curva de duración de caudales observados y simulados por los modelos HBV, GR4J y SOCONT, se muestra en la Figura 5. El umbral predeterminado de separación de caudales altos es el valor de 0,20 (20 %) hacia la izquierda, mientras que para caudales bajos es de 0,70 (70 %) hacia la derecha. Se deduce

Tabla 1: Métricas de desempeño utilizados para la comparación del rendimiento de modelos hidrológicos

Estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Desviación estándar (DE)[2]	$DE_{Q_{sim}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{sim,t} - \overline{Q}_{sim}\right)^2}$	0
Coeficiente de correlación de Pearson (CC)	$CC = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{sim,t} - \overline{Q}_{sim}\right)\cdot\left(Q_{ref,t} - \overline{Q}_{ref}\right)}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{sim,t} - \overline{Q}_{sim}\right)^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{ref,t} - \overline{Q}_{ref}\right)^2}}$	1
Bias Score (BS)	$BS = 1 - \left[\max\left(\frac{\overline{Q}_{sim}}{\overline{Q}_{ref}}, \frac{\overline{Q}_{ref}}{\overline{Q}_{sim}}\right) - 1\right]$	1
Coeficiente de Nash (Nash)	$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{sim,t} - Q_{ref,t}\right)^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{ref,t} - \overline{Q}_{ref}\right)^2}$	1
Coeficiente de Nash para valores logaritmo (Nash–ln)	$\text{Nash-ln} = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(\ln\left(Q_{sim,t}\right) - \ln\left(Q_{ref,t}\right)\right)^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(\ln\left(Q_{ref,t}\right) - \ln\left(\overline{Q}_{ref}\right)\right)^2}$	1
Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)	$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f}\left(Q_{sim,t} - Q_{ref,t}\right)^2}{n}}}{\overline{Q}_{ref}}$	0
Raíz del error cuadrático medio centrado (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=t_i}^{t_f}\left[\left(Q_{sim,t} - \overline{Q}_{sim}\right) - \left(Q_{ref,t} - \overline{Q}_{ref}\right)\right]^2}$	0



(a) calibración (b) validación

Figura 3: Diagrama de Taylor para HBV, GR4J y SOCONT

que, los modelos HBV y SOCONT subestiman los caudales con probabilidad de excedencia del

Tabla 2: Valores de parámetros optimizados (en negrita) de modelos HBV, GR4J y SOCONT mediante el proceso de calibración automática

Modelo	Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
HBV	CFMax	Coeficiente de deshielo	17.8745158	mm/°C/día
	CFR	Factor de congelación	0.2632264	-
	CWH	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.0838878	-
	TT	Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	2.0000000	°C
	TTInt	Intervalo de temperatura para lluvia nieve	2.0000000	°C
	TTSM	Temperatura umbral para el derretimiento de nieve	0.0000000	°C
	Beta	Coeficiente forma	2.5000000	-
	FC	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	**0.0631195**	M
	PWP	Punto de marchitez permanente del suelo	0.1538436	-
	SUMax	Nivel umbral de agua del Reservorio superior	**0.0539669**	M
	Kr	Coeficiente de liberación del flujo superficial	**0.0500484**	1/d
	Ku	Coeficiente de liberación del interflujo	**0.0178894**	1/d
	Kl	Coeficiente de liberación del flujo base	**0.0000691**	1/d
	Kperc	Coeficiente de liberación de percolación	**0.017696**	1/d
GR4J	X1	Capacidad del depósito de producción	**0.2223317**	M
	X2	Coeficiente de intercambio de agua	**-0.0049951**	M
	X3	Capacidad de depósito de laminación	**0.1765772**	M
	X4	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	**2.8978348**	D
SOCONT	Asn	Coeficiente de deshielo grado-día	**9.3206044**	mm/°C/día
	AsnInt	Intervalo de deshielo grado-día	**2.278902**	mm/°C/día
	AsnPh	Cambio de fase de la función sinusoidal	**35.1478456**	D
	ThetaCri	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.1000000	-
	Bp	Coeficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida	0.0125000	d/mm
	Tcp1	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida	**-0.1042677**	°C
	Tcp2	Temperatura máxima crítica para la precipitación líquida	**3.8369999**	°C
	Tcf	Temperatura crítica de la nieve	**0.5353516**	°C
	HGR3Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	**0.21473**	M
	KGR3	Coeficiente de liberación del reservorio de infiltración.	**0.0002539**	1/s
	L	Ancho del plano	1000.0000	M
	J0	Pendiente del plano	0.0100000	-
	Kr	Coeficiente de Strickler	**0.1012983**	$m^{1/3}/s$

Tabla 3: Coeficientes optimizados para estaciones meteorológicas

Parámetros	Tipo	HBV	GR4J	SOCONT
Coeff P	M	0.7884314	0.9068498	0.7000282
Coeff T	A	-1.9976902	-1.9999497	-1.2583301
Coeff ETP	M	0.8411729	1.0394633	1.4998002

M: Coeficiente de corrección multiplicativo
A: Coeficiente de corrección multiplicativo

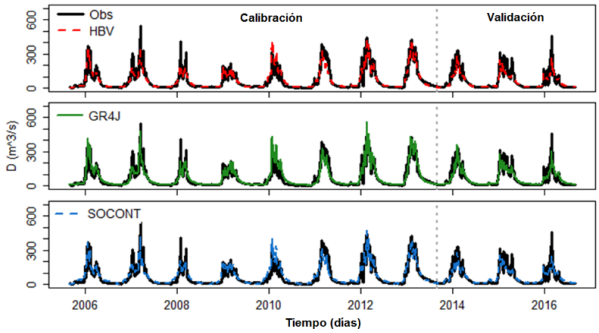


Figura 4: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de Calibración y Validación

20 % hacia la izquierda, mientras que el modelo GR4J tiene una coincidencia casi similar a los observados. Para caudales bajos los modelos HBV y GR4J sobreestiman los caudales con probabilidad de excedencia de 70 % hacia la derecha, mientras que el modelo SOCONT subestima los caudales con probabilidad de excedencia entre 90 % a 100 % y sobreestima los caudales con probabilidad de excedencia del 70 % a 85 %.

4. Conclusiones

La evaluación del desempeño de modelos hidrológicos HBV, GR4J y SOCONT para el

Tabla 4: Valores de las métricas de desempeño para el periodo de calibración y validación

Estadísticos	Calibración			Validación		
	HBV	GR4J	SOCONT	HBV	GR4J	SOCONT
Nash	0,88	0,86	0,86	0,80	0,84	0,83
Nash-ln	0,93	0,92	0,86	0,93	0,90	0,86
CC	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
BS	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99
RRMSE	0,45	0,48	0,48	0,55	0,49	0,50

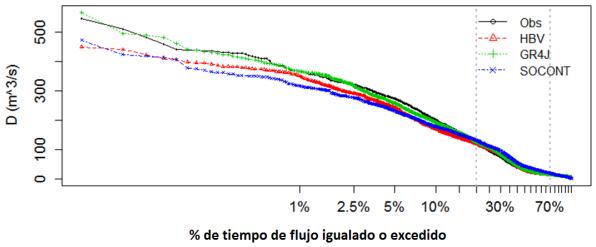


Figura 5: Curva de duración de descargas observadas y simuladas

pronóstico de caudales medios diarios en la cuenca del río Ramis, mostraron buenos estadísticos para el conjunto de datos de calibración y validación pudiendo ser considerados como herramientas robustas para el pronóstico de caudales. Sin embargo, el modelo GR4J a pesar de utilizar solo cuatro parámetros representa adecuadamente mejor las magnitudes y la variabilidad de caudales en periodos de avenida y estiaje, seguido del modelo HBV y luego del modelo hidrológico SOCONT.

Agradecimientos

Nuestro sincero agradecimiento al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Perú, por facilitar la información hidrometeorológica para la realización del presente estudio de investigación.

5. Referencias

[1] H. Madsen, "Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives," *Journal of hydrology*, vol. 235, no. 3–4, pp. 276–288, 2000.

[2] M. Mendez and L. Calvo-Valverde, "Development of the HBV-TEC Hydrological Model," in *12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future*, J. H. Kim, H. S. Kim, D. G. Yoo, D. Jung, and C. G. Song, Eds., vol. 154, Incheon, South Korea, 2016, pp. 1116–1123.

[3] S. Bergström, *Utveckling och tillämpning av en digital avrinningsmodell. Notiser och preliminära rapporter*. Stockholm: SVERIGES METEOROLOGISKA OCH HYDROLOGISKA INSTITUT, 1972.

[4] M. G. Grillakis, I. K. Tsanis, and A. G. Koutroulis, "Application of the HBV hydrological model in a flash flood case in Slovenia," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, no. 12, pp. 2713–2725, 2010.

[5] Q. Y. Jia and F. H. Sun, "Modeling and forecasting process using the HBV model in Liao river delta," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, no. 2012, pp. 122–128, 2012.

[6] G. K. Devia, B. P. Ganasri, and G. S. Dwarakish, "A Review on Hydrological Models," *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 1001–1007, 2015.

[7] G. Zhu, Y. He, D. Qin, H. Gao, T. Pu, D. Chen, and K. Wang, "The impacts of climate change on hydrology in a typical glacier region - A case study in Hailuo Creek watershed of Mt. Gongga in China," *Sciences in Cold and Arid Regions*, vol. 8, no. 3, pp. 0227–0240, 2016.

[8] B. Schaefli, B. Hingray, M. Niggli, and A. Musy, "A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments," *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2005.

[9] F. Jordan, "Modéle de prévision et de gestion des crues: optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques á accumulation pour la réduction des débits de crue," Ph.D. dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.

[10] B. Hingray, B. Schaefli, A. Mezghani, and Y. Hamdi, "Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments," *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 55, no. 6, pp. 1002–1016, 2010.

[11] C. Tobin, L. Nicotina, M. B. Parlange, A. Berne, and A. Rinaldo, "Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region," *Journal of Hydrology*, vol. 401, no. 1–2, pp.

77–89, 2011.

[12] C. Perrin, C. Michel, and V. Andréassian, "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation," *Journal of Hydrology*, vol. 279, no. 1–4, pp. 275–289, 2003.

[13] F. Jordan, J. García-Hernández, J. L. Boillat, M. P. Bieri, G. De Cesare, and A. Schleiss, "Prévision des crues sur le Yangtsé–Application du concept MINERVE," *Wasser Energie Luft*, vol. 104, no. 4, pp. 282–287, 2012.

[14] M. A. Astorayme, J. Garcia, W. Suares, O. Felipe, C. Huggel, y W. Molina, "Modelización Hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del rio Chillón, Perú," *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, vol. 4, pp. 109–124, 2015.

[15] R. Mohammed and M. Scholz, "Climate change and anthropogenic intervention impact on the hydrologic anomalies in a semi-arid area: Lower Zab River Basin, Iraq," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no. 10, pp. 1–19, 2018.

[16] J. Gray, D. Sulla-Menashe, and M. Friedl, "MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]," NASA EOSDIS Land Processes DAAC, Technical report, 2015.

[17] S. Bergström and A. Forsman, "Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model," *Nordic Hydrology*, vol. 4, no. 3, pp. 147–170, 1973.

[18] S. Bergström, "Principles and confidence in hydrological modelling," *Nordic Hydrology*, vol. 22, pp. 123–136, 1991.

[19] J. García Hernández, J. Paredes Arquiola, A. Foehn, and B. Roquier, "RS MINERVE–Technical manual v2.7," RS MINERVE Group, Switzerland, Tech. Rep., 2016.

[20] Organización Meteorológica Mundial, "Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas," in *Guía de prácticas hidrológicas*. Ginebra, Suiza: OMM, 2011, pp. 517–524.

[21] D. Shepard, "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data," in *Proc. ACM National Conference*, 1968.

[22] W. J. Gordon and J. A. Wixom, "Shepard's method of "metric interpolation" to bivariate and multivariate interpolation," *Mathematics of computation*, vol. 32, no. 141, pp. 253–264, 1978.

[23] L. Turc, *Le bilan de l'eau des sols. Relations entre les precipitations, l'evaporation et l'ecoulement*. Paris, France: Institut National de la Recherche Agronomique, 1955.

[24] S. R. Rusli, D. Yudianto, and J. T. Liu, "Effects of temporal variability on HBV model calibration," *Water Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 291–300, 2015.

[25] Q. Duan, S. Sorooshian, and V. Gupta, "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models," *Water resources research*, vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, 1992.

[26] Y. Liu, S. T. Khu, and D. A. Savic, "A Hybrid Optimization Method of Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA) and K-Nearest Neighbor (KNN) Classifier for Hydrological Model Calibration," in *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2004* . Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2004.

[27] K. E. Taylor, "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, no. D7, pp. 7183–7192, 2001.

[28] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290, 1970.

[29] N. K. Ajami, H. Gupta, T. Wagener, and S. Sorooshian, "Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system," *Journal of Hydrology,*, vol. 298, no. 1–4, pp. 112–135, 2004.

[30] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment," *Advances in Geosciences*, vol. 5, pp. 89–97, 2005.

[31] R. H. McCuen, Z. Knight, and A. G. Cutter, "Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 11, pp. 597–602, 2006.

[32] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.

[33] A. AghaKouchak and E. Habib, "Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes," *International Journal of Engineering Education*, vol. 26, no. 4, pp. 963–973, 2010.

[34] A. Ritter and R. Muñoz-Carpena, "Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments," *Journal of Hydrology*, vol. 480, no. 14, pp. 33–45, 2013.

[35] M. T. Nóbrega, W. Collischonn, C. E. M. Tucci, and A. R. Paz, "Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 585–595, 2011.

[36] Q. J. Wang, T. C. Pagano, S. L. Zhou, H. A. P. Hapuarachchi, L. Zhang, and D. E. Robertson, "Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff," *Journal of Hydrology*, vol. 404, no. 3–4, pp. 166–175, 2011.

[37] L. Feyen, R. Vázquez, K. Christiaens, O. Sels, and J. Feyen, "Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 47–63, 2000.

[38] Y. P. O., G. H. V., and S. S., "Multi-objective global optimization for hydrologic models," *Journal of*

Hydrology, vol. 181, pp. 23–48, 1998.

[39] Y. Liu, "Automatic calibration of a rainfall–runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 9533–9538, 2009.

[40] J. Refsgaard and J. Knudsen, "Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models," *Water Resources Research*, vol. 32, no. 7, pp. 2189–2202, 1996.

Oily wastewaters produced in carwashes in the city of Cumaná, Venezuela

Carlos Ortiz *

Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre "Clodosbaldo Russián". Sucre, Venezuela

Abstract.- This study presents an evaluation on the wastewater generated in different carwashes in the city of Cumaná. In order to accomplish this task, a list of all carwashes which drain wastewater in the sewer system of the city was made. The minimum average flow of wastewaters was determined for each carwash on the list. It was also determined the physical and chemical characteristics of those waters. Each one of these variables was inter-related with the source of pollution using Pearson's correlations and the resulting values were compared with the criteria established in the force environmental regulations (Gaceta Oficial de La República de Venezuela N° 5021, 1995, presidential decree 883, Chapter III, Section V: Drainage in the Sewer System). To determine the minimum average flow of wastewater produced in each carwash, the method of volume/time was applied. The determination of the wastewater characteristics was accomplished using standard methods approved by APHA, AWWA, EPA and WPCF. The resulting values were interrelated through Pearson's correlation, validating the results through hypothesis test and using the MiniTab 17 ® as a tool work. The minimum average flow of wastewaters for each carwash ranged from 12,64 m^3/h to 51,82 m^3/h. According to the physical and chemical characteristics of these tests referring to total solids, total dissolved solids, total suspended solids, sedimentables solids, BOD_5, COD, metals (Ni, Zn, Pb, Cd) oil and grease, it was determined that these values exceed the maximum permitted by official regulations. Pearson's correlation showed that the main variables used to determine and monitor these water are solids, BOD_5, COD, Cd and Pb.

Keywords: wastewaters; carwashes; lubricants.

Aguas residuales aceitosas generadas en autolavados de la ciudad de Cumaná, Venezuela

Resumen.- En este estudio se presenta una evaluación de las aguas residuales generadas en diferentes autolavados de la ciudad de Cumaná. Para alcanzar este fin, se realizó una lista de todos los autolavados que vierten las aguas residuales a la red cloacal de la ciudad. Se determinó el caudal mínimo promedio de agua residual generada en cada autolavado. Además, se determinaron las características fisicoquímicas de esas aguas residuales. Cada variable determinada se relacionó con las fuentes de contaminación utilizando la correlación de Pearson, y los valores obtenidos se compararon con los criterios establecidos en la normativa ambiental vigente (Gaceta Oficial de La República de Venezuela N° 5021, de 1995, decreto 883, Capítulo III, sección V: descarga en las redes cloacales). Para determinar el caudal mínimo promedio de agua residual producida en cada autolavado, se aplicó el método de volumen/tiempo. La determinación de las características del agua residual se realizó utilizando los métodos estándar aprobados por APHA, AWWA, EPA y WPCF. Los valores resultantes se interrelacionaron mediante la correlación de Pearson, validando los resultados a través de la prueba de hipótesis y utilizando MiniTab 17® como herramienta de trabajo. El caudal mínimo promedio generado de aguas residuales para cada autolavado varió de 12,64 m^3/h a 51,82 m^3/h. De acuerdo con las características físicas y químicas de estas pruebas que se refieren a sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, DBO_5, DQO, metales (Ni, Zn, Pb, Cd) aceites y grasas, se determinó que estos valores están por encima el máximo permitido por las regulaciones oficiales. La correlación de Pearson mostró que las principales variables utilizadas para determinar y monitorear estas aguas son los sólidos, DBO_5, DQO, Cd y Pb.

Palabras clave: aguas residuales; autolavados; lubricantes.

Recibido: 22 de marzo, 2020.
Aceptado: 08 de mayo, 2020.

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*ortizcordova@hotmail.com (C. Ortiz)

1. Introducción

En la mayoría de las ciudades antiguas del mundo la disposición de las aguas residuales se realizaba de la manera más sencilla posible,

sin tomar en cuenta el ambiente alrededor y las condiciones repulsivas que se originaban en el lugar o lugares adyacentes del vertido. Era común ver esta situación en vista de la baja densidad de población que existía en ese entonces.

El método más común que se practicaba era el riego, luego reemplazado por la dilución en alcantarillas de aguas pluviales, pero transcurrido algún tiempo se presentaron problemas al depositar las aguas residuales domésticas en estas alcantarillas ya que se excedía la capacidad de la corriente de agua en la que vertían. En consecuencia, se construyeron alcantarillas separadas y se inició así el tratamiento de aguas residuales [1].

El tratamiento sistemático de las aguas residuales surgió a finales del siglo XIX y principios del siglo pasado, y no es sino hasta las últimas décadas del siglo pasado que el mundo comenzó a observar con inquietud, a estudiar y a tratar de resolver, con mayor atención cada día, toda la serie de dificultades relacionados con la disposición de los residuos líquidos provenientes del uso doméstico, industrial y comercial [2].

En Venezuela existen un número significativo de industrias que vierten sus aguas residuales en los ductos municipales de aguas residuales, observando en las últimas décadas el colapso de las redes del servicio sanitario municipal. Como consecuencia de los problemas asociados con la mezcla de residuos domésticos e industriales, un gran número de industrias, que incluyen los autolavados, han implementado un sistema de tratamiento de sus aguas residuales, muchos de ellos basados en tratamientos fisicoquímicos tradicionales cómo la floculación, flotación, sedimentación y filtración, al respecto algunos estudios demuestran la aplicación de la floculación-flotación [3], [4], [5]. De esta manera pueden ser tratadas en el mismo punto en que son descargadas para clarificarlas antes de permitir su evacuación a las alcantarillas municipales [6].

La situación de los autolavados en la ciudad de Cumaná, se agudiza debido a que en su mayoría no disponen de tratamiento alguno o adecuado de sus aguas residuales antes de ser vertidas a la red de aguas residuales municipales, descargando así la cantidad de sustancias contaminantes, generando aguas residuales con un alta concentración de tensoactivos, aceites, grasas, ceras, metales pesados y otros, que hacen que estos residuales sean tóxicos, [7] y posteriormente vertidas en la red de aguas residuales municipales lo cual puede traer consecuencias graves en la distribución y transporte del residual hasta la planta de tratamiento municipal y como consecuencia puede colapsar la misma; además, estos contaminantes pudieran terminar en cuerpos de agua, alterando el ecosistema marino [7], [8], [9].

Las características que presentan las aguas residuales procedentes de autolavados dependen de los factores socioeconómicos de cada país. En este sentido, se han reportado en Brasil valores de DQO de 259 ± 40 mg/L; conductividad a 446 ± 55 μS/cm y turbidez a 139 ± 45 NTU;[4] en Turquía un estudio realizado reporta valores de pH 8, COD 560 mg/L, aceites y grasas 125 mg/L, sólidos suspendidos 2300 mg/L, conductividad 980 mS/cm [10].

Si se trata de establecimientos comerciales legales, por lo general se consumen grandes volúmenes de agua dulce para eliminar la suciedad de los vehículos [11, 12], como consecuencia se generan grandes cantidades de agua residual, siendo esta vertida sin tratamiento alguno a la red de aguas residuales municipales de la ciudad, incrementando la problemática. Por todo lo antes expuesto se plantea evaluar las aguas residuales generadas en diferentes autolavados de la ciudad de Cumaná. Esta investigación es particularizada en la ciudad en estudio, y en ningún caso los resultados obtenidos y las tendencias entre las variables manipuladas son extrapolables.

2. Metodología

Se visitó la División de Hacienda de la Alcaldía del Municipio Sucre, recolectando información referida a la existencia y ubicación de los autolavados legalmente registrados que realizan actividades comerciales en la ciudad de Cumaná, se localizaron ocho (8) establecimientos comerciales dedicados al lavado de automóviles ubicados en diferentes áreas de la ciudad.

La investigación se desarrolla en 4 autolavados seleccionados al azar, previo consentimiento de los dueños de esos establecimientos para la realización de la investigación. Los autolavados objeto de estudio están ubicados en distintas zonas de la ciudad de Cumaná, capital del estado Sucre.

Con la finalidad de reservar el nombre del establecimiento y todos los resultados obtenidos durante la investigación, se identificaron los autolavados con la nomenclatura: A, B, C y D, referidas a cada autolavado, ubicándolos geográficamente mediante coordenadas UTM PSAD 56 Venezuela, según las coordenadas:

- Autolavado A: 1154780,127 N 370446,313 E 118,734 m
- Autolavado B: 1154726,128 N 370672,324 E 118,734 m
- Autolavado C: 1155953,108 N 371343,303 E 103,819 m
- Autolavado D: 1157527,084 N 370340,321 E 99,875 m

En la Figura 1, se muestra el geoposicionamiento de los autolavados mediante coordenadas UTM PSAD 56 Venezuela.

2.1. Medición de caudales

Para la realización del muestreo de los aceites lubricantes residuales, se tomaron muestras simples en botellas de vidrio de un litro de capacidad, previamente esterilizadas, secas y rotuladas.

Considerando como base 8 horas diarias de trabajo en los autolavados, el día de mayor productividad se comprobó mediante información aportada por los encargados de los establecimientos tomando en consideración la jornada semanal de actividades, así como el número de vehículos lavados durante cada uno de esos días para obtener los resultados más representativos en cuanto a los análisis y medir con exactitud el caudal promedio diario y consecuentemente la carga contaminante del efluente del establecimiento comercial.

La medición de caudales se llevó a cabo durante tres semanas consecutivas de prestación de servicio utilizando el método de volumen y tiempo. Para ello se utilizó un recipiente calibrado registrándose el tiempo de llenado de este con el agua potable suministrada por la bomba del equipo dosificador usado para el lavado de automóviles. Luego se tomó el promedio del tiempo empleado para lavar diferentes tipos de automóviles y se relacionó con el caudal de agua utilizada para el lavado, determinando de esta manera la cantidad de agua utilizada para lavar un automóvil.

El caudal de agua utilizado para lavar un automóvil multiplicado por el número de automóviles diarios determina el caudal diario mínimo de agua residual generada por día en cada autolavado.

2.2. Diseño de Muestreo

Se identificaron y seleccionaron como puntos de muestreo el tanque de recepción de las aguas residuales provenientes del área de lavado de la carrocería, neumáticos y lavado de motor del vehículo.

Para la realización del muestreo de los aceites lubricantes residuales, se tomaron muestras simples cada 15 días durante 5 meses, en botellas de vidrio de un litro de capacidad, previamente esterilizadas, secas y rotuladas. Se tomaron tres muestras cada día que se realizó el muestreo para efectuar la repetibilidad de los ensayos.

2.3. Mediciones

Se determinaron los siguientes parámetros *in situ*: pH, temperatura, oxígeno disuelto (OD). Además, se determinaron parámetros según los métodos estándar, aprobados por APHA, AWWA y WEF (2005):[13] aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno ($DBO_{5,20}$), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), sólidos totales fijos (STF), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos disueltos volátiles (SDV), sólidos disueltos fijos (SDF), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos suspendidos fijos, sólidos sedimentables, hidrocarburos alifáticos, digestión de metales por ácido nítrico–ácido clorhídrico para determinar concentraciones de cadmio (Cd), zinc (Zn), plomo (Pb) y níquel (Ni).



Figura 1: Geoposicionamiento de los autolavados mediante coordenadas UTM PSAD 56 Venezuela (● Autolavado A, ● Autolavado B, ● Autolavado C, ● Autolavado D)

3. Resultados

3.1. Medición de caudales

La Tabla 1 muestra la variación diaria de autos lavados en cada uno de los establecimientos durante la primera semana de medición de caudales. Se observa que para los autolavados C y D, la afluencia vehicular para el servicio de lavado es mayor, esto podría estar relacionado con la ubicación geográfica de ambos establecimientos comerciales, para el caso del autolavado C, se encuentra ubicado en el centro de la ciudad, mientras que para el autolavado D, se encuentra ubicado en la zona este de la ciudad con elevado movimiento comercial y económico.

En la Tabla 2 se muestra la variación del caudal residual mínimo generado de aguas residuales diariamente durante la primera semana de medición. Los resultados presentados son el producto simple de la repetibilidad por triplicado de cada muestreo para determinar la variación del caudal mínimo de agua residual generada

Se observa en la tabla anterior que el volumen de agua residual generada diariamente varía entre 12,64 m^3/h (para el autolavado A, correspondiente al martes) y 51,82 m^3/h (para el autolavado D, correspondiente al sábado). Estos valores que se presentan en la Tabla 2 son el resultado del producto del número de automóviles lavados diariamente multiplicando por 0,632 m^3/h, siendo este el caudal de agua obtenido a través del método volumen/tiempo; realizando esta medición por triplicado para cada vehículo, y realizando posteriormente un promedio simple para todos los autolavados.

Estos valores obtenidos, representan un consumo de agua limpia que oscila entre 0,600 m^3 (600 L) y 0,634 m^3 (634 L) por vehículo. Esta tendencia deja ver que el servicio prestado para el lavado de automóviles es uno de los mayores consumidores de agua limpia. En general, el agua utilizada por automóvil varía entre 150 L a 600 L dependiendo del tamaño del automóvil y del equipo utilizado [9], [14].

3.2. Parámetros fisicoquímicos

En la Figura 2 se presenta la variación de los sólidos totales en aguas residuales de los distintos autolavados durante el tiempo de muestreo, se distinguen valores máximos de sólidos totales de

Tabla 1: Variación del número de autos lavados durante la primera semana de medición

Número de automóviles lavados durante la semana 1						
	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado
Autolavado A	43	20	33	23	44	29
Autolavado B	43	27	31	34	44	57
Autolavado C	68	52	39	52	71	74
Autolavado D	50	52	24	43	74	82

Tabla 2: Caudal residual mínimo generado de aguas residuales diariamente durante la primera semana de medición

Caudal mínimo generado en los autolavados en la semana 1 (m^3/h)						
	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado
Autolavado A	27,18	12,64	20,86	14,54	27,81	18,33
Autolavado B	28,18	17,06	19,59	21,49	27,81	36,02
Autolavado C	42,98	32,86	24,65	32,86	44,87	46,77
Autolavado D	31,60	32,86	15,17	27,18	46,77	51,82

46248,00 y 13960,00 mg/L para el autolavado D, y un valor mínimo de 668,00 mg/L para el autolavado C.

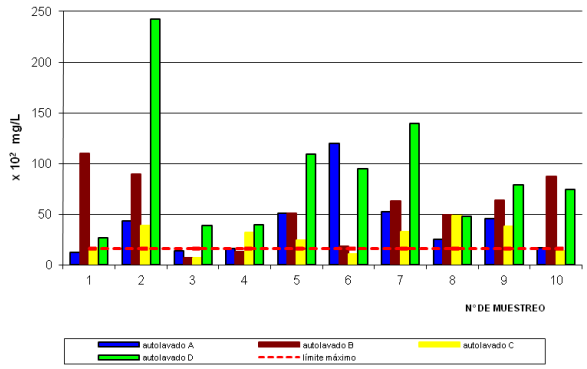


Figura 2: Variación de los sólidos totales (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

La presencia de sólidos en estas aguas se atribuye posiblemente a la gran variedad de materiales inorgánicos y orgánicos que en ellas se encuentran y que quedaron en las muestras después de ser evaporadas, entre ellos se pueden considerar principalmente el polvo, arcillas, y grasa [15].

En la Figura 2 se observa que ciertos valores de sólidos totales se encuentran por encima del límite máximo (1600 mg/L) establecido en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela No 5021, decreto 883, del 18 de diciembre de 1995 [16].

En la Figura 3 se representa gráficamente la variación de los sólidos suspendidos totales en aguas residuales de los distintos autolavados durante el tiempo de muestreo, se observa un valor máximo de 61372,00 mg/L de SST, y un valor mínimo de 1524,00 mg/L de SST.

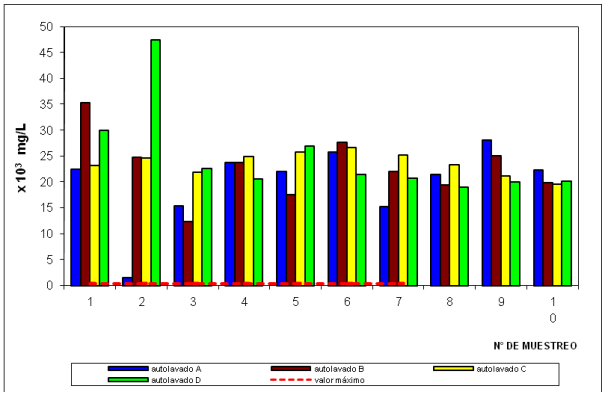


Figura 3: Variación de los sólidos suspendidos totales (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

La alta concentración de sólidos suspendidos totales en esta agua puede ser atribuible a la presencia de materiales que no fueron disueltos en el

agua como, por ejemplo, material arcilloso, mezcla aceites y polvo, entre otros, los cuales presentan un diámetro mayor a 0,47 µm y fueron retenidos por el medio filtrante. Comparando los valores obtenidos de SST con los resultados de Gutiérrez (2012), las aguas residuales de autolavados discrepan de los resultados encontrados por estos investigadores (presentan concentraciones mucho más elevadas), pudiendo atribuir esto al origen y la naturaleza de las aguas residuales [6]. Además, se puede observar en la Figura 3, que las concentraciones de sólidos suspendidos totales en cada uno de los autolavados se encuentran por encima del valor máximo permisible (400 mg/L) establecido en la normativa ambiental.

En la Figura 4 se muestra la variación de aceites y grasas en aguas residuales de los distintos autolavados durante el tiempo de muestreo, se distingue un valor máximo de 146,21 mg/L de aceites y grasas para él, y un valor mínimo de 1,99 mg/L. Los valores de aceites y grasas determinados en estas aguas se atribuyen posiblemente a la presencia de compuestos derivados del petróleo los cuales son muy abundantes en este tipo de aguas residuales, entre ellos se encuentran aceites lubricantes, grasas, entre otros.

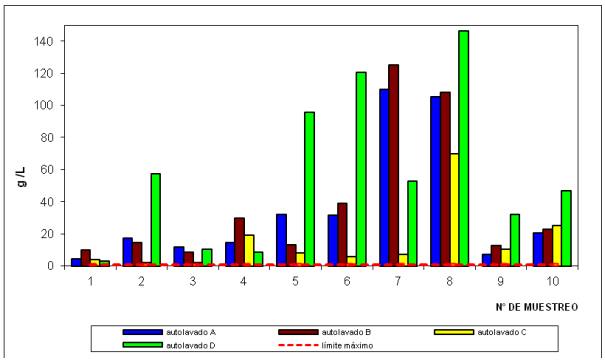


Figura 4: Variación de aceites y grasas (g/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

Por otra parte, se puede observar en la Figura 4 que los valores de aceites y grasas de todos los autolavados sobrepasan el valor máximo permisible (0,02 g/L) en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5021, decreto 883, sección V, del 18 de diciembre de 1995. Por esta razón es necesario instalar un sistema de tratamiento de estos vertidos de manera que permita eliminar la mayor parte de los aceites y grasas minerales que son generados en estos establecimientos comerciales, son recomendables sistemas basados en la separación gravimétrica mediante la instalación de tanques de eliminación de aceites (desnatadores) [17].

En la Figura 5 se presenta la variación de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales de los distintos autolavados durante el tiempo de muestreo, se observan valores máximos de 16358,00 y 13632,00 mg O_2/L, y un valor mínimo de 1430,40 mg O_2/L.

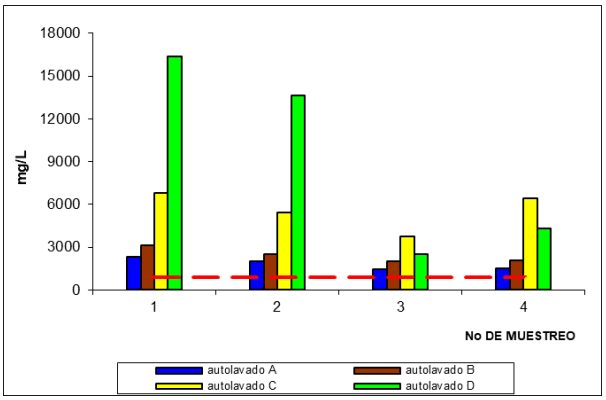


Figura 5: Variación de la demanda química de oxígeno (mg/L) en aguas residuales de los autolavados

Los valores obtenidos permiten estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua [18], la presencia de la materia orgánica puede ser debida posiblemente a los aceites y grasas, así como sólidos orgánicos que se encuentran en esta agua, esto se confirma con la alta concentración de sólidos totales volátiles presentes y con las concentraciones de aceites y grasas que en su mayor parte son derivados de hidrocarburos. Además, se observa que los valores de la DQO se encuentran por encima del valor máximo permisible (900 mg O_2/L) establecido en normativa ambiental de Venezuela.

Se aprecia en la Figura 6 la variación de la demanda bioquímica de oxígeno en las aguas residuales de los distintos autolavados, se distinguen valores máximos de 1489,00 y 1362,18

mg O_2/L y un valor mínimo de 558,43 mg O_2/L DBO_5. Los altos valores encontrados en la prueba de la DBO_5 aportan una medida indirecta de la materia orgánica presente, ya que en realidad se mide la concentración de oxígeno disuelto que es consumido por los microorganismos cuando degradan la materia orgánica [19]. La presencia de materia orgánica en las aguas residuales de los autolavados se puede confirmar analizando las la variación de sólidos volátiles: totales y suspendidos, respectivamente, representando un estimado de la presencia de materia orgánica en estas agua residuales.

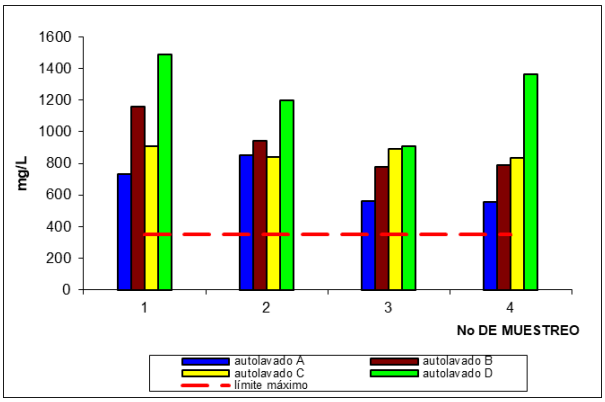


Figura 6: Variación de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) en aguas residuales de los distintos autolavados

En la Figura 7 se presenta la variación de cadmio en las aguas residuales de los distintos autolavados, se observa un valor máximo de 0,03 mg Cd/L, y un valor mínimo de 0,001 mg Cd/L. La presencia de cadmio en las aguas residuales se relaciona con algunos procesos químicos, por ejemplo, se usa en forma de óxido en la fabricación de las baterías, en la producción de pinturas y como catalizador en la refinación del petróleo, este último puede representar uno de los principales aportes de cadmio en esta agua, además la presencia de este metal también puede ser debido al proceso de galvanoplastia [20]. Se puede observar en la Figura 7 que la concentración de cadmio se encuentran por debajo del valor máximo permisible 0,20 mg Cd/L, establecido en la normativa ambiental.

Mediante la Figura 8 se representa la variación

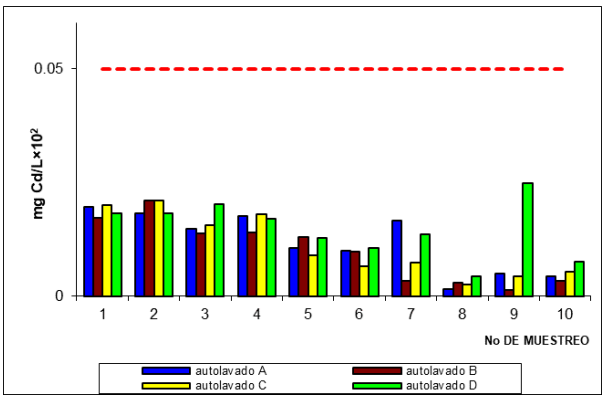


Figura 7: Variación de la concentración de cadmio (mg Cd/L), en aguas residuales de los distintos autolavados

de la concentración de plomo total en las aguas residuales, se observan los valores máximos de 265,55 mg Pb/L para el autolavado B, y 261,36 mg Pb/L, y un valor mínimo de 137,64 mg Pb/L. La presencia de plomo en las aguas residuales provenientes de los autolavados puede ser debida al desgaste de la pintura de los vehículos (muchos pigmentos contienen plomo como constituyente de su formulación), también en considerable el aporte de plomo mediante derrames de líquido o partículas desprendidas de las baterías de los vehículos.

La presencia de plomo en las cantidades encontradas posiblemente interferirá en los diversos tratamientos que se aplican a los vertidos municipales, y posteriormente, influirá en muchos usos provechosos del agua dada su toxicidad [8]. Analizando los valores determinados de Pb en las fases orgánicas y acuosas de las aguas residuales, se desprende que el mayor aporte de plomo lo suministra la fase orgánica, es decir, en el aceite lubricante de desecho y grasas presentes en esta agua residuales. Además, se observa que todos los valores de la concentración de Pb están por encima del valor máximo permisible 0,50 mg Pb/L, establecido en la normativa legal vigente de Venezuela.

3.3. Análisis estadístico: matriz de correlación de pearson

Se calcula el producto del coeficiente de correlación de Pearson entre cada par de variables mediante el software estadístico Minitab 17®. El

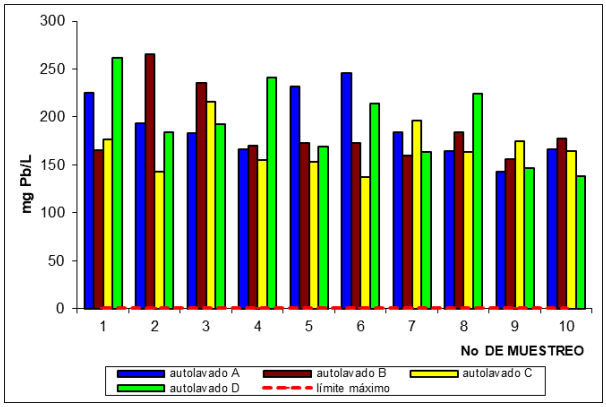


Figura 8: Concentración de plomo total (mg Pb/L) en las aguas residuales de los autolavados

coeficiente de correlación lineal (r) mide el grado de asociación de esta posible relación entre las variables. Este coeficiente se aplica cuando la relación que puede existir entre las variables es lineal (es decir, si representáramos en un gráfico los pares de valores de las dos variables la nube de puntos se aproximaría a una recta). Dicho coeficiente oscila entre –1 y +1; un valor de –1 indica una relación lineal o línea recta positiva perfecta. Una correlación próxima a cero indica que no hay relación lineal entre las dos variables [21].

Para el caso del trabajo que se presenta la hipótesis nula es "no hay correlación entre dos parámetros". Se especifica para el análisis que se muestra un valor de significancia de 1 %, y se rechazará la hipótesis nula si el resultado de la muestra es muy diferente del valor hipotético que una diferencia de dicha magnitud ocurriría por casualidad con una probabilidad del 1 %, es decir, la probabilidad de observar un valor muestral (valor-p) tan extremo o más que el valor observado, dado que la hipótesis nula es verdadera. Si el valor p es menor que el nivel de significancia (0,01), la hipótesis nula se rechaza, si el valor p es mayor que el nivel de significancia (0,01), la hipótesis nula no se rechaza.

Se aplicó el análisis de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros por cada autolavado. En la Tabla 3 se observa, para el autolavado A, que existe relación lineal altamente significativa entre los ST y STF ($r = 0,983$ y $p = 0$) indica que cuando se consideran los sólidos de estos residuales como un todo, estos están representados mayoritariamente por el material fijo no volátil, en este caso los sólidos y aceites de elevados puntos de ebullición y difíciles de volatilizar. Ahora, cuando se consideran los componentes individuales de sólidos totales es decir, SST y SDT, observamos que se presentan una relación lineal altamente significativa entre los SST y SSV, como SST = SSV + SSF se revela que para el caso de los SST, estos están compuestos mayoritariamente por el material suspendido volátil o material orgánico que al calcinarse se transforma en CO_2 y H_2O, registrándose ($r = 0,830$ y $p = 0,003$).

Para la relación altamente significativa que se presenta entre los STV y DBO ($r = 0,807$ y $p = 0,003$) se revela la estrecha relación entre el material total volátil (material orgánico) y la materia orgánica carbonosa representada por la DBO, en otras palabras, otra manera de determinar el contenido de materia orgánica sería mediante la determinación de los sólidos totales volátiles para este tipo de residuales. En cuanto a la relación altamente significativa que se presenta entre la DQO y la DBO ($r = 0,986$ y $p = 0$) esto es de esperar, ya que la DQO depende tanto del material carbonoso presente como del material nitrogenado, así como de todos aquellos compuestos o elementos susceptibles de ser oxidados por el $K_2Cr_2O_7$, pero como este tipo de residual, como se observó anteriormente, está compuesto mayoritariamente del material orgánico carbonoso, es lógico observar una relación estrecha entre dos variables.

Al analizar la relación lineal altamente significativa entre DQO con el Cd y con el Pb ($r = 0,775$ y $r = 0,902$) respectivamente, se infiere que estos materiales presentan igual origen o procedencia, es decir, origen orgánico y antropogénico, y su presencia es característico en todos los residuales procedentes de la industria petroquímica o de hidrocarburos, y por consiguiente es de esperar que están presentes en este tipo de residuales.

Las correlaciones significativas derivadas entre unos parámetros fisicoquímicos son de importancia para la selección del tratamiento adecuado para las aguas residuales de los autolavados. Por ejemplo, la relación entre la DBO y DQO registró un

Tabla 3: Valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) y los valores p de la prueba de hipótesis para el autolavado A

		ST	STV	SST	DQO
STF	r	0,983	—	—	—
	p	0,000	—	—	—
SSV	r	—	—	0,830	—
	p	—	—	0,003	—
DBO	r	—	0,807	—	0,986
	p	—	0,005	—	0,000
Cd	r	—	—	—	0,775
	p	—	—	—	0,008
Pb	r	—	—	—	0,902
	p	—	—	—	0,003

Tabla 4: Valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) y los valores p de la prueba de hipótesis para el autolavado B

		ST	STV	DQO	DBO
STF	r	0,880	—	—	—
	p	0,001	—	—	—
STV	r	0,856	—	—	—
	p	0,002	—	—	—
SSF	r	0,854	0,815	—	—
	p	0,002	0,004	—	—
DBO	r	—	—	1,000	—
	p	—	—	0,000	—
Cd	r	—	—	0,832	0,831
	p	—	—	0,003	0,003

coeficiente de correlación $r = 0,986$, lo que indica que estas aguas residuales pueden ser fácilmente tratables mediante procesos biológicos [1].

La correlación lineal altamente significativa entre la DQO con Cd y Pb ($r = 0,775$ y $r = 0,986$, respectivamente) permite confirmar que estos metales están asociados a las actividades de la refinación del petróleo, cuyos productos son de origen orgánico.

Se muestra en la Tabla 4, para el autolavado B, una relación lineal altamente significativa entre ST y STF ($r = 0,880$ y $p = 0,001$) indica que el contenido de los sólidos totales para los residuales de este autolavado depende, en igual proporción, tanto de los STF, como de los STV como lo demuestra el factor de correlación obtenido ($r = 0,856$ y $p = 0,002$) en concordancia con la expresión ST = STF + STV.

Al observar la relación altamente significativa entre los ST y los SSF ($r = 0,853$ y $p = 0,002$) se infiere que los sólidos totales están conformados mayoritariamente por el SST de acuerdo con ST = SST + SSD, y estos a su vez presentan mayor contenido de SSF de acuerdo con SST = SSF + SSV, indicando poca contribución del material suspendido volátil en el contenido de los sólidos suspendidos totales.

Se percibe, una relación lineal altamente significativa entre la DQO y DBO ($r = 1$ y $p = 0$) reflejando la contribución del material orgánico carbonoso representado por la DBO para este tipo de residual, asimismo, la relación lineal significativa entre DBO y Cd ($r = 0,832$ y $p = 0,003$) refleja la presencia de cadmio está determinada por el contenido del material orgánico carbonoso, reflejando que su fuente de origen son los hidrocarburos provenientes de las actividades de la refinación del petróleo.

En la Tabla 5 se distingue para el autolavado C, al igual que los autolavados antes mencionados, una relación lineal altamente significativa entre los ST y los STF ($r = 0,928$ y $p = 0$), sabiendo que los ST = STF + STV, se puede inferir que los sólidos totales para los residuales de este autolavado están conformados en mayor proporción por el material total fijo, con poca contribución del material total volátil.

Tabla 5: Valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) y los valores P de la prueba de hipótesis para el autolavado C

		ST	SST	DQO
STF	r	0,928	—	—
	p	0,000	—	—
SSV	r	—	0,942	—
	p	—	0,000	—
DBO	r	—	—	0,986
	p	—	—	0,008

Por otro lado, para el caso del material suspendido, se presenta una relación lineal altamente significativa entre los SST y los SSV, sabiendo que SST = SSF + SSV, se puede inferir que los SSV transformable por calentamiento en

CO_2 y H_2O se encuentra en mayor proporción con respecto a los SSF, revelando la gran influencia de los hidrocarburos petroquímicos en las características de los residuales procedentes de este autolavado.

En la Tabla 6, para el autolavado D, existe relación lineal altamente significativa entre los ST y los STF con valores de ($r = 0,997$ y $p = 0$) esto indica que el contenido de sólidos totales para los residuales de este autolavado está conformado en mayor proporción por material fijo, en conformidad con ST = STF + STV. Al observar la relación lineal altamente significativa entre los ST y los SST entre los cuales se registran valores de ($r = 0,912$ y $p = 0$) se infiere que los sólidos totales están conformados mayoritariamente por material suspendido de acuerdo con ST = SST + SSD, indicando poca contribución de material disuelto en estos residuales. Además, se observa que existe correlación lineal altamente significativa entre los (STF y los SST registrándose valores de ($r = 0,902$ y $p = 0$) esto infiere que los ST están conformados en mayor proporción por material no volátil, es decir material fijo, en concordancia con lo establecido por la expresión ST = STV + STF, y los STF a su vez presentan mayor proporción de SST, de esta manera se indica poca contribución de material disuelto.

Tabla 6: Valores del coeficiente de correlación de Pearson (r) y los valores P de la prueba de hipótesis para el autolavado D

		ST	STF	SSF	SSV	DQO
STF	r	0,990	—	—	—	—
	p	0,000	—	—	—	—
SST	r	0,912	0,902	—	—	—
	p	0,000	0,000	—	—	—
DQO	r	—	—	0,978	—	—
	p	—	—	0,002	—	—
DBO	r	—	—	—	0,957	—
	p	—	—	—	0,003	—
Cd	r	—	—	—	—	0,901
	p	—	—	—	—	0,099

Para la relación altamente significativa que se presenta entre los SSV y la DBO ($r = 0,957$ y $p = 0,003$) se revela la estrecha relación entre el material orgánico volátil y la materia orgánica carbonosa representado por la DBO, es decir, una manera de determinar el contenido de materia orgánica en este tipo de residuales es mediante la determinación de SSV.

4. Conclusiones

Los parámetros de calidad del agua, tanto los físicos como los químicos (DBO, DQO, aceites y grasas, metales), se afectan por la presencia de altas concentraciones de aceites lubricantes (de origen mineral) y de sólidos totales en estas aguas residuales.

Mediante la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales se infiere que estas aguas presentan alta carga de contaminantes, sobrepasando el límite máximo establecido en la normativa ambiental vigente, Gaceta Oficial de la República de Venezuela, N° 5021 (1995), Decreto N° 883, Capítulo III, sección V: descarga en las redes cloacales.

De acuerdo a la matriz de correlación de Pearson se determinó la relación lineal entre los parámetros analizados para cada autolavado, demostrando que existe proporcionalidad para:

- Autolavado A: ST-STF, STV-DBO, SST-SSV, DQO-DBO, DQO-Cd, DQO-Pb.
- Autolavado B: ST-STF, ST-STV, ST-SSF, STV-SSF, DQO-DBO, DQO-Cd, DBO-Cd.
- Autolavado C: ST-STF, SST-SSV, DQO-DBO.
- Autolavado D: ST-STF, ST-SST, STF-SST, SSF-DQO, SSV-DBO.

Indicando que los principales parámetros que se pueden utilizar para caracterizar y monitorear estos residuales son: sólidos, DBO, DQO, Cadmio y Plomo.

5. Referencias

[1] Metcalf & Eddy, Inc., *Ingeniería Sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*, 2nd ed. Barcelona: Editorial Labor, S.A, 1995.

[2] G. Rivas Mijares, *Tratamiento de Aguas Residuales*, 2ª ed. Barcelona: Editorial VEGA, 1978.

[3] J. Rubio, E. Carissimi, and J. Rosa, "Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil," *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 30, no. 2, pp. 193–207, 2007.

[4] J. Rubio and R. Zaneti, "Treatment of washrack wastewater with water recycling by advanced flocculation-column flotation," *Desalination and Water Treatment*, vol. 8, pp. 146–153, 2009.

[5] R. Zaneti, R. Etchepare, and J. Rubio, "Car wash wastewater treatment and water reuse: A case study," in *8th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse*, Barcelona, Spain, 2011.

[6] G. Gutierrez, "Propuestas de alternativas para la disminución de efluentes industriales y el diseño de un sistema de tratamiento en la empresa Goodyear Productos Industriales C.A. Valencia," Trabajo de Grado de Ingeniería, no publicado, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2012.

[7] J. Brasino and J. Dengler, *"Practical" Fish Toxicity Test Report*, 1st ed. Washington: Environmental Partners, 2007.

[8] R. Zaneti, R. Etchepare, and J. Rubio, "Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, pp. 953–959, 2011.

[9] A. Al-Odwani, M. Ahmed, and S. Bou-Hamad, "Carwash water reclamation in Kuwait," *Desalination*, vol. 206, pp. 17–28, 2009.

[10] Z. B. Gönder, G. Balcioğlu, I. Vergili, and Y. Kaya, "Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization," *Journal of Environmental Management*, vol. 200, pp. 380–390, 2017.

[11] W. Lau, A. Ismail, and S. Firdaus, "Treatment of carwash effluent using ultrafiltration and nanofiltration membranes," *Separation and Purification Technology*, vol. 104, pp. 26–31, 2013.

[12] K. Boussu, C. Kindts, C. Vandecasteele, and B. Van Der Bruggen, "Applicability of nanofiltration in the carwash industry," *Separation and Purification Technology*, 2007.

[13] APHA, AWWA y WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st ed. Washington DC, USA: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2005.

[14] M. Panizza and G. Cerisola, "Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 1: Anodic oxidation with diamond and lead dioxide anodes," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 638, no. 1, pp. 28–32, 2010.

[15] C. Baird, *Química Ambiental*, 1era ed. España: Editorial REVERTÉ, 2001.

[16] Gaceta Oficial República de Venezuela, *Decreto N° 883. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*, Publicado en Gaceta Oficial Nº 5021, del 18 de diciembre de 1995, Venezuela, 1995.

[17] G. Kiely, *Ingeniería Ambiental: fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. Volumen I*. Madrid: Editorial McGRAW HILL Interamericana, 1999.

[18] R. Crites y G. Tchobanoglous, *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Bogotá: Editorial McGRAW HILL, 2000.

[19] M. Davis y S. Masten, *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 1st ed. México: Editorial McGRAW HILL, 2005.

[20] M. Grau, *Toxicología Ambiental*. España: Editorial McGRAW HILL, 2003.

[21] P. Moreu, *Estadística Informatizada*, 1era ed. Madrid: Editorial Paraninfo, 1999.

Influence of the number of passes on residual efforts when welding an ASTM A131 steel through the GMAW process

Albenis Díaz [a], Sergio Guerra [a], Maritza Villalta *[,a], Carmelo Torres [b]

[a]*Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*
[b]*Centro de Investigación de Mecánica (Cimec), Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*

Abstract.- The research work aims to quantify the generation of residual stresses in welded joints of an ASTM A131 naval steel with two, three and four weld beads under the GMAW process. The residual stresses were quantified by means of a comparison of the stress states of the parent metal and the welded material, using specified mathematical models for this purpose. Finally, a comparative analysis of the conditions was carried out to determine the state in which the greatest residual stresses are found. It was observed that the hardness profile reached its maximum value in the weld face, gradually decreasing in the direction of the base metal where it stabilized at the hardness value of said base metal. Based on this condition, it is possible to quantify the residual stresses of the welded samples using mathematical models based on the values obtained through the Vickers microhardness test, and they can be correlated with the values of the residual stresses obtained through the tensile test for control and non-control specimens.

Keywords: residual stresses; mechanical properties; number of passes; welding GMAW; ASTM A131 steel.

Influencia del número de pasadas sobre los esfuerzos residuales al soldar un acero ASTM A131 mediante el proceso GMAW

Resumen.- El trabajo de investigación tiene como finalidad cuantificar la generación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas de un acero de uso naval ASTM A131 con dos, tres y cuatro cordones de soldaduras bajo el proceso GMAW. Los esfuerzos residuales fueron cuantificados por medio de una comparación de los estados de esfuerzos del metal base y el material soldado, haciendo uso de modelos matemáticos especificados para tal fin. Finalmente se realizó un análisis comparativo de las condiciones para así determinar el estado en que se encuentra los mayores esfuerzos residuales. Se pudo observar que el perfil de dureza alcanzó su valor máximo en el cordón de soldadura, disminuyendo paulatinamente en dirección al metal base en donde se estabilizó al valor de dureza de dicho metal base. De acuerdo a esta condición, es posible cuantificar los esfuerzos residuales de las muestras soldadas haciendo uso de los modelos matemáticos basados en los valores obtenidos a través del ensayo de microdureza Vickers, y se pueden correlacionar con los valores de los esfuerzos residuales obtenidos a través del ensayo de tracción para las probetas testigos y no testigos.

Palabras clave: esfuerzos residuales; propiedades mecánicas; número de pasadas; soldadura GMAW; acero ASTM A131.

Recibido: 20 de enero, 2020.
Aceptado: 14 de julio, 2020.

1. Introducción

Los procesos de soldadura son comúnmente utilizados a niveles industriales, por el simple hecho que el diseño de máquinas y estructuras sin el desarrollo de uniones conectadas (es decir, remachadas, atornilladas, etc.) o uniones soldadas entre las piezas que la conforman es imposible. El método de soldadura es de gran simplicidad y bajo precio. Para la soldadura se debe emplear energía térmica y fundir los metales que se desean unir, así como también, la eliminación del óxido y humedad del material, para lograr una buena fusión y solidificación de los materiales en contacto. El calor en los metales genera expansión y contracción, lo cual afecta la estructura del material durante el calentamiento aplicado en una parte del material. El grado de deformación se ve afectado

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*maritza.villalta@gmail.com (M. Villalta)

por el calentamiento no uniforme del metal base y por el grado de embridamiento que tenga el mismo y será función directa del gradiente de temperatura y el coeficiente de dilatación del material calentado [1].

Las series de expansiones y contracciones térmicas ocurridas durante los procesos de soldadura originan esfuerzos internos en las juntas soldadas. Éstos se pueden atenuar por medio de tratamientos mecánicos y/o térmicos; sin embargo, no pueden ser eliminados en su totalidad, originando los denominados esfuerzos residuales los cuales pueden ser perjudiciales en una pieza en servicio [2].

Adame [3] realizó un estudio sobre tratamiento térmico post soldaduras en junta soldadas de acero ASTM A 106GR-B a fin de modificar las propiedades mecánicas de dichas juntas, verificando las magnitudes de los defectos residuales originadas durante el proceso. Por otra parte, Castro [4] realizó un análisis integral de las variables que afectan el cordón de soldadura en un reactor DC302 el cual presentaba fractura frecuente que impedía su correcta investigación. Aplicó una metodología que sirve como base para el trabajo actual. Finalmente, Pérez [5] realizó un estudio de la soldadura GTAW y del proceso SMAW para unir planchas de acero inoxidable AISI 304 con acero al carbono ASTM A36, en su trabajo se brindan una serie de recomendaciones en la evaluación de las juntas soldadas las cuales fueron tomadas en el desarrollo de la presente investigación.

En Venezuela, la soldadura GMAW está entre los seis procesos utilizados actualmente, seguido por procesos como el SMAW (Shield Metal Arc Welding), Soldadura Oxiacetilénica, entre otros. Esto se puede correlacionar a las grandes ventajas que posee este procedimiento con respectos a otras técnicas de soldadura como pueden ser: velocidades de deposición superiores a las de SMAW, es un proceso de bajo hidrógeno, adecuado para grandes espesores, los soldadores aprenden rápido, etc. Necesitando entonces, el desarrollo de estudios específicos sobre el comportamiento de los metales, en este caso el ASTM A131, bajo las condiciones que este proceso de soldadura implica [6].

2. Metodología

2.1. *Materiales*

El material seleccionado para la fabricación de las probetas, es acero ASTM A131 [7], que al realizarle el ensayo de espectroscopía de emisión atómica se obtuvo la composición química mostrada en la Tabla 1, que concuerda con las especificaciones en la norma ASTM A131.

Tabla 1: Composición química del acero ASTM A131 obtenido por el ensayo de espectroscopía

Elemento	(%)
C	0,09
Si	0,26
Mn	0,79
Cr	0,00
Ni	0,00
Mo	0,00
Cu	0,00
S	0,01
P	0,02

2.2. *Realización del cordón de soldadura proceso GMAW*

Se cortaron con máquina de corte de metal tipo sierra cinta continua las 6 planchas de $220 \times 400 \times 5{,}9$ mm, que posteriormente fueron soldadas para formar 3 uniones, dichas dimensiones se muestran en la Figura 1. Se realizó el cordón de soldadura mediante el proceso GMAW con electrodo ER70S-6, el mismo se utilizó tanto para penetración como para relleno en cada junta soldada, con amperaje constante según las especificaciones de cada condición [8].

2.3. *Corte de probetas*

Luego de obtener las juntas soldadas, se procedió a cortar las láminas en pletinas según el código ASME sección IX, que establece para láminas de menos de 3/4" de espesor las dimensiones mostradas en la Figura 2 [9]. Posteriormente a realizar el corte de las láminas utilizadas para las probetas, éstas se mecanizaron con el apoyo laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

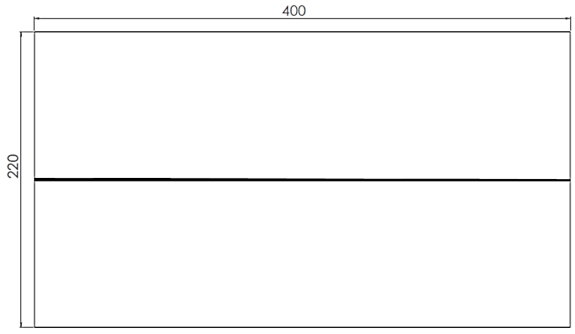


Figura 1: Lámina soldada a utilizar en procedimientos experimentales

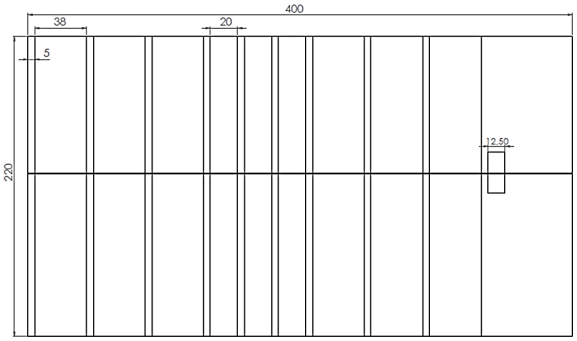


Figura 2: Corte de las láminas para la realización de probetas según la norma ASME sección IX QW-463.1 (a). [9]

2.4. *Ensayo metalográfico*

La preparación de las probetas para el análisis metalográfico de las diferentes condiciones se basó en la norma ASTM E407 [10], las muestras se prepararon en la sección transversal de cada unión soldada con las condiciones de estudio, para evaluar metalográficamente la soldadura y las diferentes zonas producto de este proceso. Estos ensayos están divididos de la siguiente manera:

2.4.1. *Ensayo de macroscopía*

Este ensayo mostró a un aumento máximo de 10X las imperfecciones, número de pases de soldadura, entre otros defectos. Para ello se aplicó un desbaste de la superficie de la probeta y posteriormente se realizó un ataque químico, haciendo uso de un reactivo compuesto por yodo al 10 % en yoduro de potasio al 20 %. El ataque se aplicó hasta observar diferencias apreciables entre el cordón de soldadura y el metal base.

2.4.2. *Ensayo de microscopía óptica*

Para el análisis de la microestructura de las zonas características de las probetas soldadas, se utilizó el microscopio óptico, a un aumento de 200X y 400X. La metodología del ataque químico, se aplicó bajo la norma ASTM E407-99.

2.4.3. *Ensayo de microdureza*

El método a utilizar para este ensayo es el de la microdureza Vickers, bajo los parámetros de la norma ASTM E384 [11], esta norma define la prueba de microdureza que se realiza para la evaluación de materiales, control de calidad de los procesos de fabricación e investigación y desarrollo. Se establecieron 17 medidas por cada una de las probetas de forma perpendicular al ancho de la muestra, con una carga de 50 grf, todo fundamentado bajo los requerimientos de la norma ASTM E384-11 [12]. La evaluación de microdureza se llevó a cabo con la toma de 3 medidas para cada región de la probeta, metal base (MB) y zona afectada por el calor (ZAC) y 5 medidas en el cordón de soldadura (CS); como se ilustra en la Figura 3, para de esta manera establecer un perfil de microdureza en cada una de las probetas soldadas con su condición respectiva y con ello obtener la magnitud de los mismos en las zonas indicadas con anterioridad.

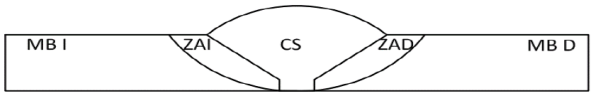


Figura 3: Representación de las zonas donde se realizó la identación para evaluar la microdureza [12]

2.5. *Tracción*

Para este ensayo se utilizaron tres probetas para cada condición de soldadura (2, 3 y 4 pasadas) y tres para la caracterización del material base. Siendo un total de doce probetas.

El estudio se basó en la norma ASTM A370 [13] (para condición inicial) y ASTM E8/E8M [14] (para condición soldada) donde se especifica en detalle las dimensiones normalizadas de las probetas para llevar a cabo el ya mencionado ensayo

de tracción según se observa en la Figura 4. Este ensayo se efectuó, haciendo uso del equipo de ensayos universal Galdabini aplicando una carga máxima de 20000 N a una velocidad de 2 mm/min.

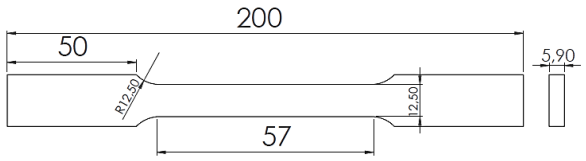


Figura 4: Plano de probeta de tracción según la norma ASTM E-8. [14]

2.6. *Doblado*

Este ensayo se realizó únicamente para las condiciones de material soldado. Empleándose así, seis para cada condición (2, 3 y 4 pasadas). Tres de éstas fueron para el doblado de raíz y las tres restantes para el doblado en cara.

El ensayo de doblado se realizó bajo la norma ASTM E190 [15]. Enfocado principalmente, en estudiar la condición de la soldadura. Agrietamientos durante el doblado indicarían discontinuidades en la junta y dependiendo de sus tamaños y densidad pudieran considerarse defectos en el proceso de soldado. La Figura 5 muestra las dimensiones de la probeta.

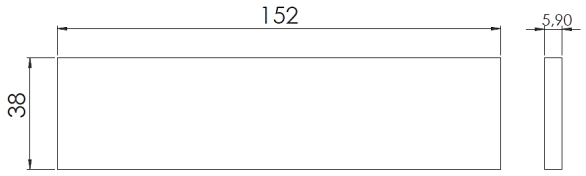


Figura 5: Plano de probeta de doblado, según la norma ASTM E190. [15]

2.7. *Cálculo de los esfuerzos residuales a través modelos matemáticos*

Para realizar el cálculo de los esfuerzos residuales se utilizaron los modelos matemáticos expresados desde la ecuación (1) a la ecuación (5). Se calcularon dichos valores de dos maneras, a través de los resultados del ensayo de microdureza y a través de los resultados del ensayo de tracción.

Los resultados del ensayo de microdureza Vickers se calcularon a través de las ecuaciones (1) y (2) [16].

$$\sigma_{res} = SY_{PT} - SY_{PTN} \tag{1}$$

$$\sigma_{res} = (-90,7 + 2,876Hv)_{PT} - (-90,7 + 2,876Hv)_{PNT} \tag{2}$$

Los resultados del ensayo de tracción se calcularon a través de las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$\sigma_{res,f} = \sigma_{t,f} - \sigma_{nt,f} \tag{3}$$

$$\sigma_{res,max} = \sigma_{t,max} - \sigma_{nt,max} \tag{4}$$

$$\sigma_{res,R} = \sigma_{t,R} - \sigma_{nt,R} \tag{5}$$

3. Resultados y discusiones

3.1. *Caracterización del acero naval ASTM A131 (metal base)*

Aplicando la técnica de microscopía al acero naval ASTM A131 se observa que presenta una estructura básica de los aceros de bajo carbono, compuesta por granos de ferrita y perlita, como se muestran en las micrografías a 200X en la Figura 6a y a 400X en la Figura 6b.

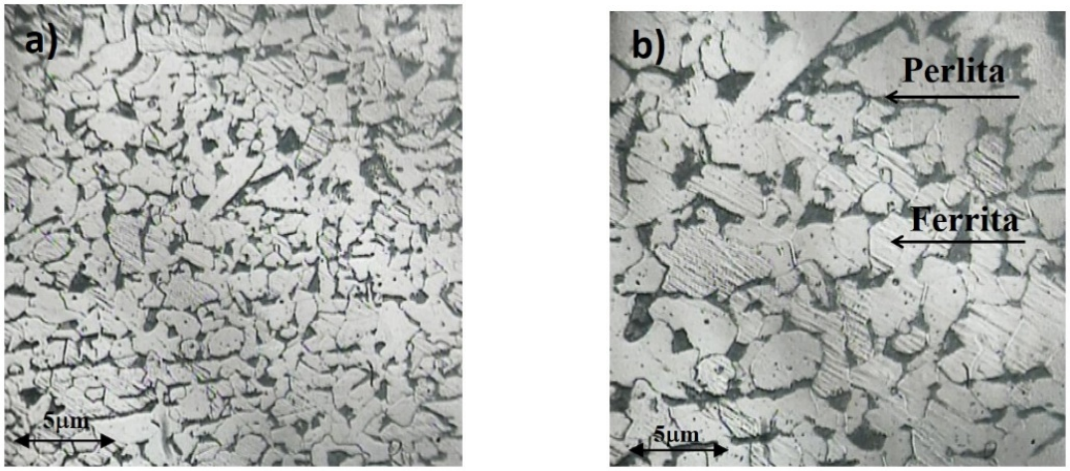
3.2. *Microdureza Vickers*

Este ensayo se realizó utilizando una carga de 50grf. En él se determinó la dureza del metal base en la cual se tomaron identaciones para luego tener un valor promedio, tal como se muestra en la Tabla 2.

3.3. *Ensayo de tracción*

Por medio de este ensayo se determinaron las propiedades mecánicas del material base obteniéndose las cargas (en toneladas) y luego se transformaron los esfuerzos en unidades del sistema internacional, como se aprecia en la Tabla 3.

En la Figura 7 se puede observar la curva esfuerzo deformación del acero ASTM A131 una



(a) 200X. (b) 400X.

Figura 6: Micrografías de probetas de metal base

Tabla 2: Microdureza Vickers metal base

Identación	Microdureza Vickers (HV)
1	145,3
2	146,8
3	147,5
4	145,9
5	147,5
Promedio	**146,6**

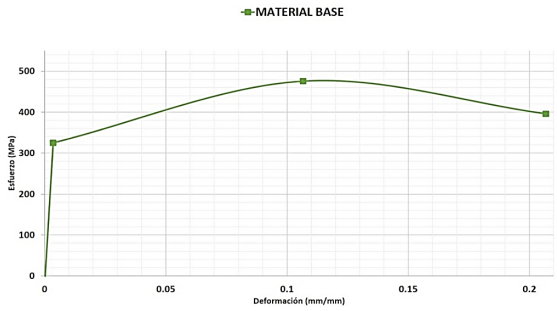


Figura 7: Curva esfuerzo-deformación de metal base

Tabla 3: Esfuerzos promedios obtenidos mediante el ensayo de tracción para el metal base

	Esfuerzo (MPa)
Fluencia	325,27
Máximo	475,46
Ruptura	396,13

vez calculados los promedios resultantes para cada esfuerzo de interés.

Se observa que al correlacionar los resultados obtenidos en el ensayo de material base, estos se encuentran dentro de lo establecido en la norma ASTM A131, verificándose así que se trata de dicho material

3.4. Valores de los parámetros utilizados para los procesos de soldadura

En la Tabla 4 se presentan los parámetros empleados en el proceso de soldadura.

Tabla 4: Parámetros de soldadura para el proceso GMAW

Parámetro	Especificación
Voltaje (V)	20
Amperaje (A)	100
Velocidad de soldadura (cm/min)	68
Velocidad de alimentación(m/min)	6,8
Diámetro de alambre (mm)	1,0

3.5. *Caracterización de las juntas soldadas en el acero naval ASTM A131*

Para iniciar la caracterización de las juntas soldadas, se realizó la evaluación macroscópica de estas, para cada una de las condiciones de soldadura. En la Figura 8 se observan las macrografías según el número de pasadas de la junta.

3.6. *Análisis del ensayo macroscópico*

En todas las muestras estudiadas se puede observar la diferencia entre el cordón de soldadura, zona afectada y el material base perfectamente. En la condición con dos cordones de soldadura Figura 8a, se pude notar que no fundió completamente el material, debido a la presencia de una zona hueca en la unión del cordón de cara con el de raíz, a su vez es importante mencionar que no existe presencia de oxidación. Estas mismas características se presentan en la siguiente muestra Figura 8b, correspondiente a la condición con tres cordones de soldadura. Esta muestra presenta una penetración del material de aporte por ambos lados, carece de óxido superficial, se observa un lado con mayor fusión respecto al otro, se puede observar claramente el cordón de soldadura, zona afectada y el material base. En último lugar, la muestra con cuatro cordones de soldadura Figura 8c, presenta una penetración del material de aporte por ambos lados y carece de óxido superficial.

3.7. *Análisis de la microscopía óptica con II cordones de soldadura*

Continuando con la caracterización microestructural se realizó el ensayo de microscopía óptica que muestra los resultados de la metalografía óptica convencional y las secciones transversales de las probetas soldadas mediante el proceso GMAW.

Para la condición de dos pasadas se tiene que en las tres zonas de la muestra estudiada se observaron los mismos constituyentes de granos de ferrita con dispersiones de perlita. El metal base y material de aporte tuvieron características similares, excepto en la cantidad de perlita presente, observándose en mayor porcentaje en el cordón.

En la zona del cordón de soldadura (CS), de la Figura 9a, se observa una disminución del tamaño de grano y la presencia de una estructura ferrítica de Widmanstätten de granos aciculares.

En la zona afectada por el calor (ZAC), de la Figura 9b, se observa una disminución en el tamaño del grano y el alargamiento de algunos provocado por el calentamiento del metal y posterior enfriamiento. Esta zona posee estructura de ferrita Widmanstätten (Parte clara) y perlita (Parte oscura). En el metal base (MB), de la Figura 9c, se presenta una estructura de granos de ferrita (parte clara) de tamaño heterogéneo y de perlita (parte oscura) dispuestos de forma alargada, evidencia del laminado en caliente.

3.8. *Análisis de la microscopía óptica con III cordón de soldadura*

El cordón de soldadura o zona de fusión (CS) se muestra en la Figura 10a. Se observa la presencia de una estructura ferrítica de Widmanstätten, de granos desordenados y con un tamaño reducido. La matriz que se observa es ferrita típica de un acero hipoeutectoide.

La zona afectada por el calor (ZAC) se observa en la Figura 10b, existe una disminución del tamaño de los granos, además del arreglo homogéneo de éstos, provocado por el efecto de calor de la soldadura. Esta zona posee algunos granos de ferrita y abundante perlita producida por el enfriamiento lento.

El metal base (MB) se muestra en la Figura 10c. Se presenta una estructura de granos de ferrita (parte clara) de tamaño desigual y de perlita (parte obscura) dispuestos de forma alargada, evidencia del laminado en caliente.

3.9. *Análisis de la microscopía óptica con IV cordón de soldadura*

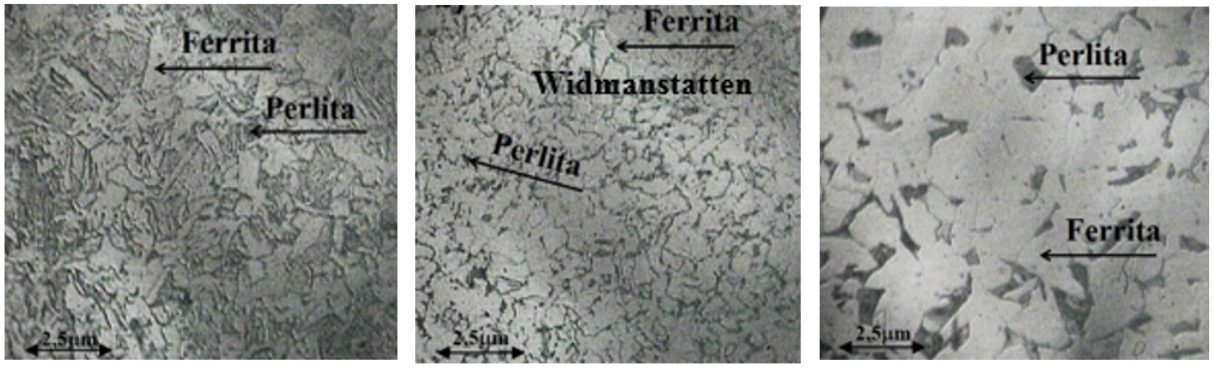
El cordón de soldadura o zona de fusión (CS) se muestra en la Figura 11, se observa una disminución del tamaño de grano y una formación de estructuras dendríticas dispersas. Se observa la presencia de una estructura ferrítica de Widmanstätten.

La zona afecta por el calor (ZAC) se muestra en la Figura 11, se aprecia una estructura de granos de tamaño reducido respecto al metal base, pero donde se observa aún la tendencia equiaxial, con



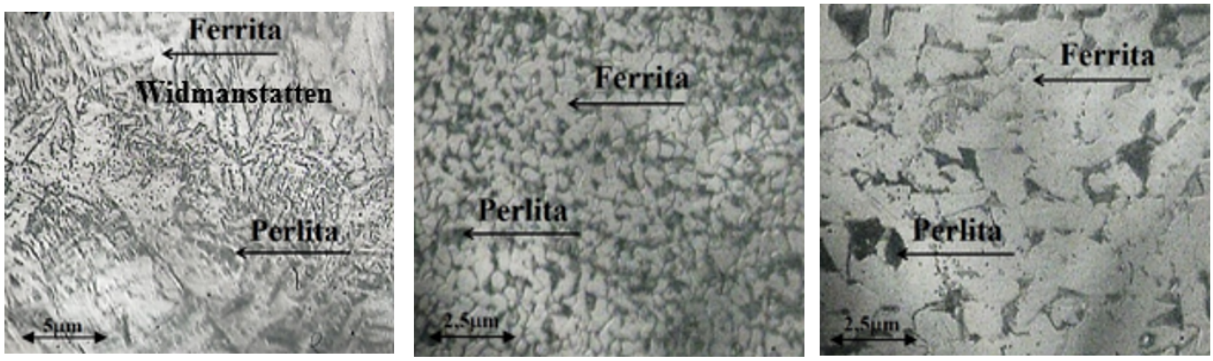
(a) Dos pasadas. (b) Tres pasadas. (c) Cuatro pasadas.

Figura 8: Macroscopía de probeta soldada



(a) CS. (b) ZAC. (c) MB.

Figura 9: Micrografías de probetas soldadas II cordones a 400X



(a) CS. (b) ZAC. (c) MB.

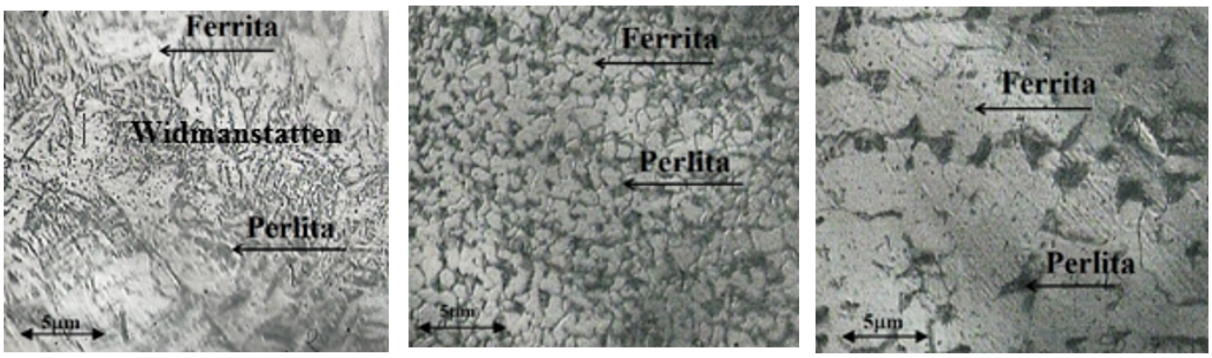
Figura 10: Micrografías de probetas soldadas III cordones a 400X

granos ferrítica en su totalidad, además de algunos granos de perlita.

3.10. Ensayo de microdureza Vickers

Este ensayo se realizó utilizando una carga de 50grf. Se realizaron seis identaciones en las tres regiones características de la soldadura (MB, ZAC y CS) quedando distribuidas como se expone en la Figura 12, con el fin de obtener valores de microdureza en cada uno de los pases aplicados, y a continuación, en la Tabla 5 se presentan los valores promedios obtenidos en cada una de las zonas en cuestión.

Estos valores obtenidos en el ensayo se utilizan para construir la curva mostrada en la Figura 13, correspondiente a las tres condiciones de interés.



(a) CS. (b) ZAC. (c) MB.

Figura 11: Micrografías de probetas soldadas IV cordones a 400X

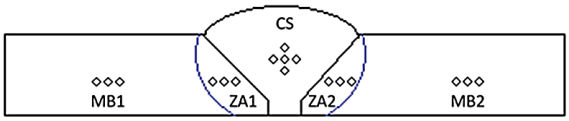


Figura 12: Representación de las zonas donde se realizó la identación para evaluar la microdureza

Tabla 5: Microdureza Vickers promedio para cada zona

Zona	Nº de Pasadas		
	2	3	4
MB1	157,1	150,1	141,5
ZA1	168,3	158,2	162,6
CS	189,9	197,9	211,9
ZA2	172,9	163,6	171,9
MB2	141,9	137,2	149,5

3.11. Análisis de los resultados de microdureza

Estudiando primeramente cada condición (dos, tres y cuatro pasadas), es evidente el aumento de la dureza Vickers a medida que se hace el estudio desde el metal base hasta la zona del cordón de soldadura, esto debido a que en la zona inmediatamente adyacente a la línea de fusión (lugar donde se sitúa el punto más alto de dureza), existió un aumento en el tamaño de grano, seguido de un refinamiento de grano hasta el lugar donde se encuentra el metal base. Las altas temperaturas alcanzadas, ocasionaron que la ferrita y perlita original se transformaran en austenita durante el calentamiento y luego ésta se transformó en ferrita y perlita que inicialmente presentó tamaño de grano grueso y que al alejarse de la zona de soldadura refinaron su tamaño de grano durante el enfriamiento respecto al original del metal base.

Haciendo un análisis comparativo entre las tres condiciones de estudio, es notable que el mayor valor de la dureza obtenida es de 211,90 HV; ese valor corresponde a un aumento en el tamaño de grano, seguido de un refinamiento de grano hasta el lugar donde se encuentra el metal base, producto del calentamiento por conducción, que recibe de la zona de soldadura corresponde a la probeta con cuatro cordones de soldadura en la zona CS. Por otro lado, el menor valor observado en la zona afectada térmicamente corresponde a la condición de tres cordones con 158,2 HV (Figura 13).

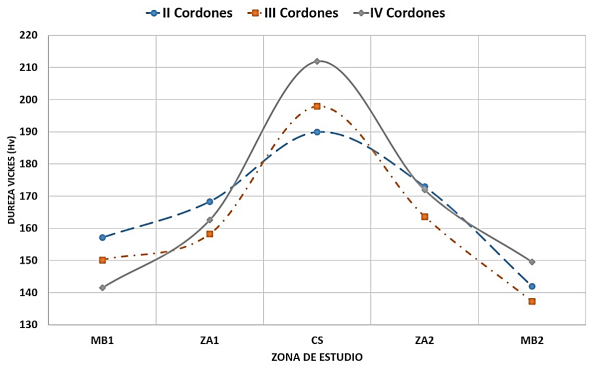


Figura 13: Curva de microdureza de cada cordón de soldadura

3.12. Ensayo de tracción

Por medio de este ensayo se caracterizaron las propiedades mecánicas de las uniones soldadas,

obteniéndose las cargas (en toneladas). En la Figura 14 se observan las respectivas curvas esfuerzo-deformación arrojadas para las tres condiciones de estudio, adicionando a ésta, necesariamente, la correspondiente a la del metal base.

De las curvas esfuerzo-deformación para cada condición estudiada se extrajeron el valor de los esfuerzos (fluencia, máximo y ruptura), porcentajes de elongación alcanzados por cada probeta. Estos datos se observan en la Tabla 6, los cuales se utilizaron para el correspondiente análisis. De igual manera, los porcentajes de elongación respectiva para cada condición se especifican en la Figura 15.

Tabla 6: Valores de esfuerzos (fluencia, máximo y ruptura), porcentaje de elongación de cada condición de soldadura

Esfuerzos	Cordones		
	II	III	IV
Fluencia (MPa)	354,15	335,45	338,59
Máximo (MPa)	484,72	471,91	489,97
Ruptura (MPa)	386,08	353,866	378,46
Elongación (%)	19,45	16,89	14,99

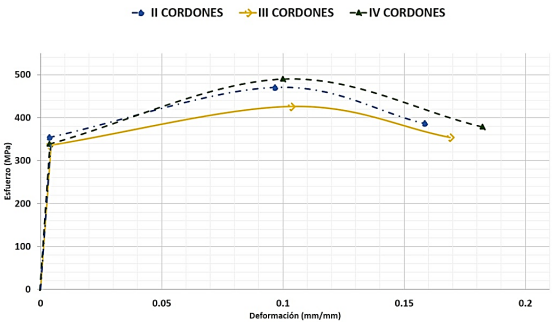


Figura 14: Curvas esfuerzo–deformación valores promedio para condición de soldadura

Se puede observar en la Figura 16 que los valores de esfuerzo de fluencia de las tres condiciones soldadas están por encima de los estipulados para el metal base de ASTM A131 (Tabla 6), siendo este valor significativamente mayor para el caso de dos cordones de soldadura. Prestando atención al esfuerzo máximo, es claro determinar que el mayor valor obtenido corresponde exclusivamente

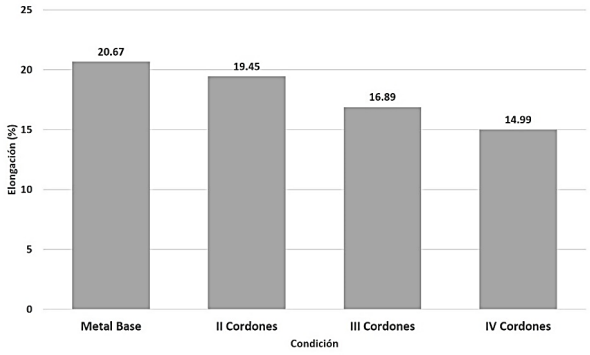


Figura 15: Comparación del % ductilidad de metal base y número de pasadas

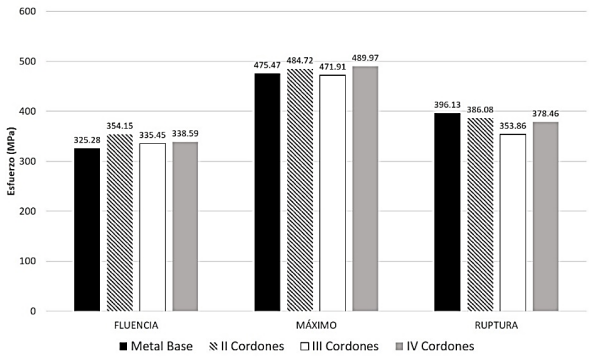


Figura 16: Comparación del esfuerzo de fluencia de metal base y número de pasadas

a la condición con cuatro cordones de soldadura, esto probablemente debido al producto de la combinación de alta temperatura de fusión experimentada, seguido de una disminución de la temperatura durante el tiempo que permanece la corriente base, luego al iniciar el siguiente cordón, se repite el ciclo progresivamente y como consecuencia se consigue un enfriamiento más lento uniforme y sucesivo de la regiones soldadas.

3.13. Esfuerzos residuales

El cálculo de esfuerzos residuales por micro-dureza Vickers, es para la cuantificación de los esfuerzos residuales a través de este ensayo. En primer lugar, se determina el esfuerzo de fluencia basado en la microdureza Vickers utilizando la ecuación (1) y cuyos valores se muestran en la Tabla 7.

Seguidamente se calcula el esfuerzo de fluencia basado en la dureza Vickers para el material base y

Tabla 7: Microdureza Vickers promedio metal base y cada condición de soldadura

MB	Dureza (HV) Pasadas		
	II	III	IV
146,6	166,0	161,4	167,4

las probetas soldadas según condición, se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: Esfuerzos de fluencia para cada probeta

Esfuerzo	MB	Pasadas		
		II	III	IV
SY (MPa)	331,02	386,80	373,51	390,96

Se calculan los esfuerzos residuales a través del ensayo de microdureza Vickers, utilizando los valores de esfuerzo de fluencia que se encuentran en la Tabla 8 y haciendo uso de la ecuación (2). A continuación, se muestran los esfuerzos residuales obtenidos para cada condición en la Tabla 9.

Tabla 9: Esfuerzos residuales obtenidos por microdureza Vickers

Esfuerzo	Pasadas		
	II	III	IV
σ_{res} (MPa)	55,78	42,49	59,94

3.14. Análisis de los esfuerzos residuales obtenidos a través del ensayo de microdureza Vickers

La Figura 17. Muestra los esfuerzos residuales calculados utilizando los valores de microdureza obtenidos en los ensayos para cada condición soldada y basándose en la ecuación (1). Se observa que se obtuvieron mayores esfuerzos al emplear cuatro cordones de soldadura.

La condición en la cual el material se ve afectado en menor medida se presenta empleando tres pasadas, con menores esfuerzos residuales bajo esta condición de estudio.

3.15. Análisis de los esfuerzos residuales obtenidos a través del ensayo de tracción

El cálculo de esfuerzos residuales por el ensayo de tracción se obtiene a partir de los valores de esfuerzo tanto para las probetas soldadas como para las naturales o sin soldar. En la Tabla 10. Se muestran los resultados de los esfuerzos residuales calculados para todas las condiciones estudiadas, utilizando las ecuaciones (3), (4) y (5).

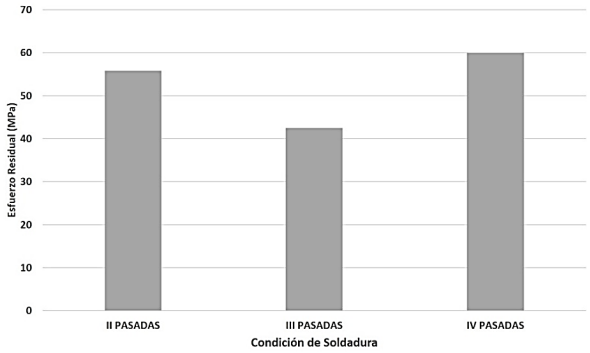


Figura 17: Esfuerzos residuales obtenidos por microdureza Vickers

Tabla 10: Esfuerzos mecánicos residuales obtenidos mediante el ensayo de tracción

Esfuerzo	Cordones		
	II	III	IV
$\sigma_{res,y}$(MPa)	28,88	10,18	13,31
$\sigma_{res,mx}$ (MPa)	9,25	-3,56	14,50
$\sigma_{res,u}$ (MPa)	-10,05	-42,27	-17,67

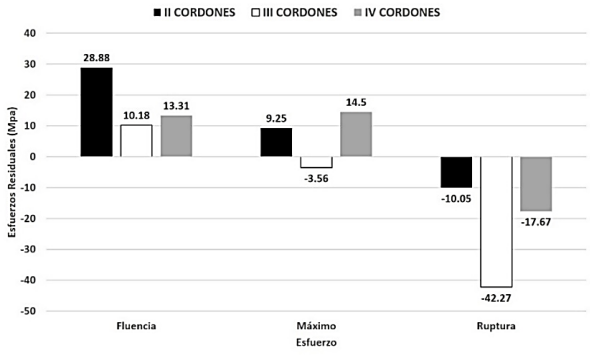
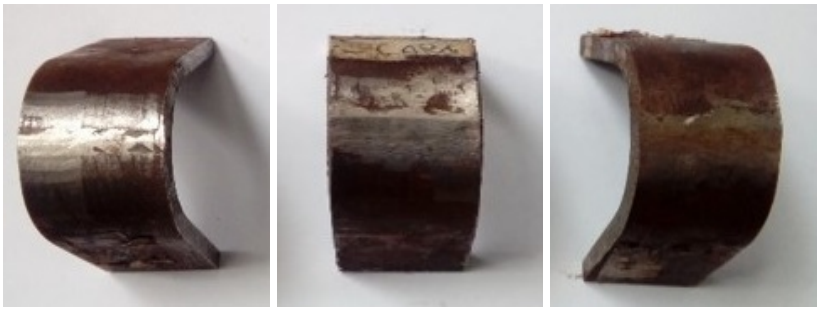


Figura 18: Esfuerzos mecánicos residuales obtenidos mediante el ensayo de tracción

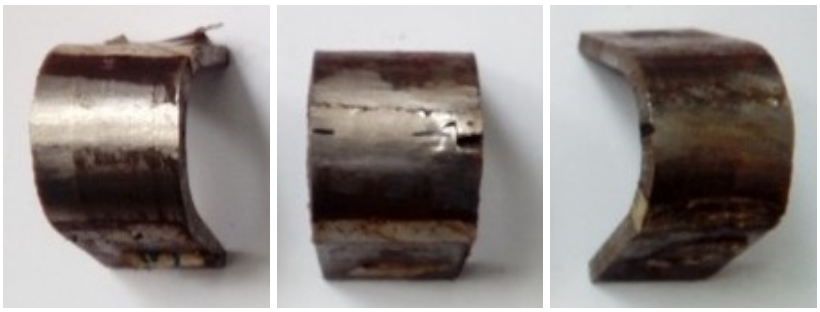


(a) doblado de cara. (b) doblado de cara. (c) doblado de cara.

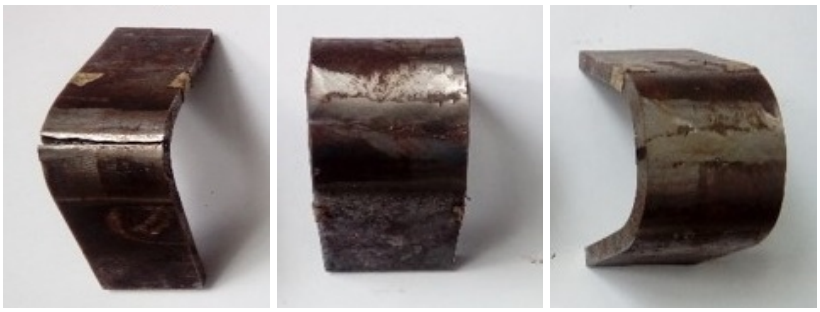


(d) doblado de raíz. (e) doblado de raíz. (f) doblado de raíz.

Figura 19: Probetas con 2 cordones de soldadura



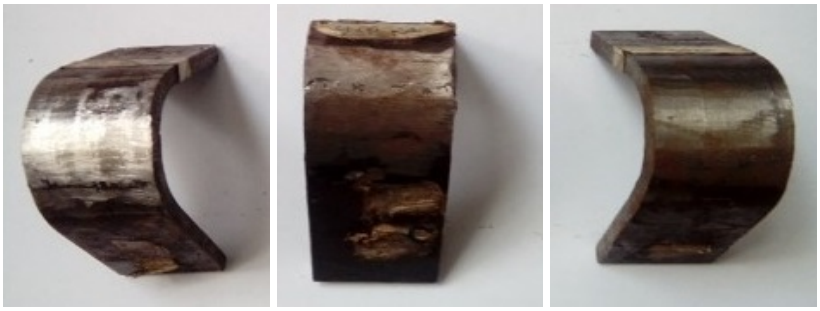
(a) doblado de cara. (b) doblado de cara. (c) doblado de cara.



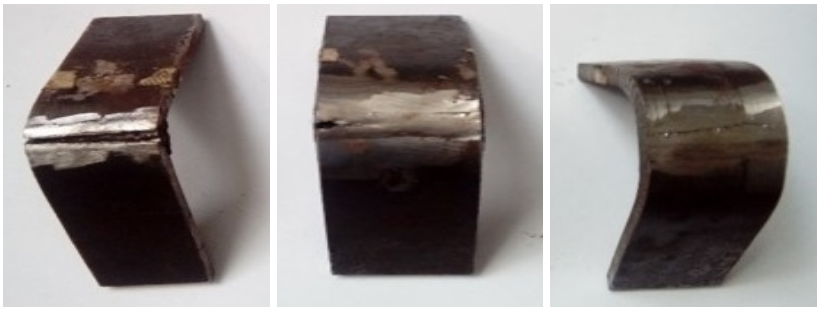
(d) doblado de raíz. (e) doblado de raíz. (f) doblado de raíz.

Figura 20: Probetas con 3 cordones de soldadura

Al realizar el análisis de los esfuerzos residuales conseguidos a través del ensayo de tracción (Figura 18), se puede determinar una tendencia general en cuanto a las tensiones internas generadas por el calor, esto consiste en una clara disminución de los esfuerzos residuales generados y transmitidos a partir de los esfuerzos de fluencia, obteniéndose, posteriormente, esfuerzos



(a) doblado de cara. (b) doblado de cara. (c) doblado de cara.



(d) doblado de raíz. (e) doblado de raíz. (f) doblado de raíz.

Figura 21: Probetas con 4 cordones de soldadura

residuales de menor magnitud para las siguientes circunstancias (esfuerzos máximo y ruptura). Esto probablemente debido a la formación de las microestructuras de ferrita y perlita.

3.16. Ensayo de doblado

Las Figuras 19, 20 y 21 corresponden a las probetas dobladas para cada condición soldada mediante el proceso descrito, tanto de raíz como de cara, siguiendo lineamientos del código ASME sección IX.

3.17. Análisis del ensayo de doblado

Una vez estudiadas las tres muestras dobladas para cada condición en cada uno de los ensayos realizados (cara y raíz), se puede apreciar que en gran parte de las muestras presentan un buen estado una vez realizado dicho ensayo. Soportando así, buena parte de éstas, un doblado completamente en U. Las probetas dobladas mostraron ausencia de grietas y/o desgarres, lo cual es indicativo de un buen cordón de soldadura.

En los casos particulares de las Figuras 19f, 20d y 21d, se puede observar desgarre en las probetas que corresponden a los doblados de raíz para dos, tres y cuatro pasadas respectivamente. Se encontró que la grieta formada estaba asociada con una fusión incompleta en la raíz, probablemente producto de una limpieza insuficiente entre los bordes de las juntas a soldar o pudo haberse generado esta situación como producto de un calentamiento incorrecto.

4. Conclusiones

El acero naval ASTM A131 en estudio presentó una microdureza Vickers promedio de 146,63 HV; con esfuerzo de fluencia de 325,28 MPa; esfuerzo máximo de 475,47 MPa y esfuerzo último de 396,13 MPa; lo cual está dentro de los valores permitidos dentro de la norma ASTM A131. El carbono obtenido para el acero naval ASTM A 131 fue de 0,09; lo que indica que se encuentra dentro del grupo de los aceros de bajo carbono de estructura conformada por granos de ferrita y granos de perlita, eutectoide, laminar de ferrita y cementita.

En el cordón de soldadura se encontraron estructuras ferríticas de Widmanstätten ya que en esa zona existe valores altos de microdureza. Se puede decir que el número de pasadas influye

sobre el valor de los esfuerzos residuales ya que el calor aportado favorece la formación de microestructura con características como la ferrita de Widmanstätten y la perlita.

Mediante el proceso GMAW es posible cuantificar los esfuerzos residuales de las muestras soldadas haciendo uso de los esfuerzos de fluencia obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers.

Mediante los modelos matemáticos empleados se puede hacer una comparación de la variación de esfuerzos residuales con respecto a la microdureza Vickers obtenido en cada condición soldada, la diferencia de 1 % de dicha microdureza en las probetas con dos y cuatro cordones de soldadura, podría traducirse en una variación del 7 % en los esfuerzos residuales calculados.

5. Recomendaciones

Aplicar el estudio con las mismas condiciones empleando procesos de soldadura donde no influya la habilidad del soldador, para el desplazamiento a la hora de mover el electrodo.

Estudiar el comportamiento mecánico y microestructural, haciendo uso de los mismos parámetros de trabajo, pero con aceros de mayor espesor.

Llevar a cabo pruebas de impacto a la junta soldada a temperaturas a las cuales están sometidos los cascos de las embarcaciones, con el fin de generar las gráficas de transición.

6. Referencias

[1] K. Masubichi, *Analysis of Welded Structures*. Elmsfor: Pergamon Press, 1980.

[2] Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), "Metalmecánica. "Metalurgia de la Soldadura"," SENATI, Perú, Reporte técnico, 2013.

[3] M. Adame, "Estudio del Tratamiento Térmico Post Soldadura GTAW en Tuberías de Procesos de Acero al Carbono ASTM A106 GR B y su Incidencia en la Resistencia a la Tracción y Dureza," Trabajo Especial de Grado, Materiales, Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Tungurahua, 2015.

[4] I. Castro, "Estudio Para Evaluar y Calificar el Procedimiento de Soldadura del Acero SA-312TP347," Trabajo Especial de Grado, Materiales, Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma de México, Coyoacán, Distrito Federal, 2013.

[5] G. Pérez, "Fabricación y Evaluación de Juntas Soldadas de Acero Inoxidable Austenítico AISI 304 con Acero ASTM A36 Mediante Proceso de Soldadura Eléctrica al Arco," Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Distrito Capital, 2010.

[6] J. Nadzam, *Gas Metal Arc Welding: Product and Procedure Selection*. United States: Lincoln electric Company, 2014.

[7] ASTM A131 / A131M-94, *Standard Specification for Structural Steel for Ships*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

[8] American Welding Society (AWS) A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials, *Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Flux Cored Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding - AWS A5.36/A5.36M:2016*, 2nd ed. American Welding Society (AWS), 2016.

[9] American Society of Mechanical Engineers, *ASME IX QW, Desarrollo y calificación de procedimientos y soldadores*, ASME Std., 2005.

[10] ASTM E407-07, *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[11] ASTM E384, *Método de Prueba Estándar para Microindentación-Dureza de los materiales*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[12] ASTM E384-11, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

[13] ASTM A370-97a, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

[14] ASTM E8 / E8M-16a, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[15] ASTM E190-92(2008), *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

[16] G. Busato and P. Busato, "La influencia del número de pasadas de soldadura en un tubería de acero ASTM A106 Gr- B," Trabajo especial de grado. Escuela de Ingeniería Mecánica, Univeridad de Carabobo, 2004.

Design an algorithm for analyzing the stability of information exchange between UAVS in the high-order agent formation

O. R. Kuzichkin *,[a], G. S. Vasilyev [a], D. I. Surzhik [b]

[a]*Belgorod State University, Belgorod, Russia*
[b]*Vladimir State University, Vladimir, Russia*

Abstract.- Interaction of vehicles in the formation allows to perform tasks that are difficult or impossible for individual mobile agents. It is proved that for reliable functioning of mobile agent formations, it is necessary to ensure the stability of the system when the dynamic parameters of the agents vary and interference of small and large levels is affected. This problem is particularly relevant for a formation that is affected by complex unstable environmental conditions, in particular, for the formation of unmanned aerial vehicles (UAVs). To study the parametric stability of the formation of high-order agents with variable dynamic parameters, a new method and algorithm based on the Nyquist frequency criterion and the piecewise linear approximation of the hodograph was developed. A computational experiment was performed to analyze the stability of formations with inertial characteristics of filters of various types and orders from the 1st to the 10th. The verification of the calculated boundaries of the stability regions of mobile agent formations with different inertial properties using the Routh-Hurwitz criterion and the D-partition method confirmed the correctness of the results obtained and the effectiveness of the proposed method.

Keywords: multi-agent formation; mobile agent formation; unmanned aerial vehicle (UAV); information exchange; parametric stability; Nyquist criterion.

Diseño de un algoritmo para analizar la estabilidad del intercambio de información entre UAVS en la formación de agentes de alto nivel

Resumen.- La interacción de los vehículos en la formación permite realizar tareas que son difíciles o imposibles para los agentes móviles individuales. Está comprobado que para el funcionamiento confiable de las formaciones de agentes móviles, es necesario asegurar la estabilidad del sistema cuando los parámetros dinámicos de los agentes varían y la interferencia de niveles pequeños y grandes se ve afectada. Este problema es particularmente relevante para una formación que se ve afectada por condiciones ambientales inestables complejas, en particular, para la formación de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Para estudiar la estabilidad paramétrica de la formación de agentes de alto orden con parámetros dinámicos variables, se desarrolló un nuevo método y algoritmo basado en el criterio de frecuencia de Nyquist y la aproximación lineal por partes del hodógrafo. Se realizó un experimento computacional para analizar la estabilidad de formaciones con características de inercia de filtros de varios tipos y órdenes del 1 al 10. La verificación de los límites calculados de las regiones de estabilidad de las formaciones de agentes móviles con diferentes propiedades de inercia utilizando el criterio de Routh-Hurwitz y el método de partición D confirmó la exactitud de los resultados obtenidos y la efectividad del método propuesto.

Palabras clave: formación de múltiples agentes; formación de agentes móviles; vehículos aéreos no tripulados; intercambio de información; estabilidad paramétrica; criterio de Nyquist.

Received: May 13, 2020.
Accepted: June 24, 2020.

1. Introduction

Recent technological advances have led to an interest in autonomous adaptive vehicle formations. The development of advanced technologies for managing individual vehicles, the rapid growth of computing resources and the characteristics of communication systems, as well as miniaturization capabilities, have made it

* Correspondence author:
*e-mail:*eav@ores.su (O. R. Kuzichkin)

possible to implement vehicles that interact both autonomously with the environment and with other means. The interaction of vehicles in the formation allows you to perform tasks that are difficult or impossible for individual mobile agents. The satellite group way to deal with space missions requires science and innovation progresses in a few key regions. Among these difficulties is understanding the elements of satellites in nearness to one another so that a development can be keenly structured, controlled, also, recreated. A diagram of on-going examination in this region under the TechSat 21 program alongside primer discoveries is given [1].

The main satellite set in circle is the "control satellite" and controls all the satellites to be amassed and contains the PC, order direction hardware, exactness direction gear, and different highlights important to impact rendezvous [2]. Hill's relative movement conditions were utilized to demonstrate the devotee satellite's movement comparative with the pioneer [3]. The issue of robotized control of a Lcader/Mringman development flight is broke down [4]. Applications of multi-agent formations include unmanned aerial vehicles (UAVs) were studied [5]. The control issues related with self-governing vehicles in arrangement flight was explored [6].

An extensive frameworks investigation of the variables inducing the plan, advancement, and arrangement of such a framework was summed up [7]. The achievements to date on the improvement of programmed vehicle control innovation in the Program on Advanced Technology for the Highway (PATH) at the University of California, Berkeley, were summed up [8]. Moreover, different consistent separating vehicle adherent calculations were examined [9].

The problem of modeling the dynamics of formations consisting of many agents presents significant computational difficulties. Therefore, it is promising to evaluate the reliability of formations based on various stability criteria, which avoids direct modeling of dynamic processes in multi-agent systems, and thus reduce computational costs. In addition, it is promising to obtain generalized solutions about the stability of a particular system that are valid when its parameters vary over a wide range of values due to changes in the agents' own characteristics and the influence of external destabilizing factors.

The known works analyze the stability of mobile agent formations, both linear [10] and nonlinear [11], investigate the issues of synchronization and adaptive control of the formation [12], [13] and investigate the influence of the bandwidth of the information exchange channel between agents on the stability of the agent system and its dynamic properties in general [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. At the same time, most studies are limited to analyzing the stability of formations described by low-order dynamics at fixed values of dynamic parameters. This problem is particularly relevant for a formation that is affected by complex unstable environmental conditions, in particular, for a UAV formation.

The purpose of this work is to design an algorithm for analyzing the parametric stability of high-order agent formations with variable dynamic parameters for studying information exchange in UAV networks.

2. Parametric stability of a formation of high-order agents with variable dynamic parameters

Design an algorithm for analyzing the parametric stability of a formation of high-order agents with variable dynamic parameters

According to [10], K(s) stabilizes the dynamics of the agent formation with many inputs and many outputs P(s) according to the equation (1).

$$\rho(W(j\omega)) < M^{-1} \quad \forall\, \omega \in (-\infty, \infty), \qquad (1)$$

where $W(j\omega)$ is estimated by equation (2).

$$W(j\omega) = \frac{P(j\omega)K(j\omega)}{(I + P(j\omega)K(j\omega))}, \qquad (2)$$

I is the unit matrix. This condition allows you to check the stability of the formation of linear agents according to the Nyquist criterion. The Nyquist criterion states that a repetitive waveform can be correctly reconstructed provided that the

sampling frequency is greater than double the highest frequency to be sampled. The relevance of the problem of parametric stability analysis is determined by the need for successful operation of the formation with variations in the parameters of mobile agents and the impact of small and large-scale interference. For the study of parametric stability, it is proposed to use a combined approach based on the Nyquist frequency criterion, D-partitioning by a set of parameters, and piecewise linear approximation of the hodograph [22].

The proposed method using approximation by continuous piecewise linear functions [22], [23] allows to analyze the parametric stability of formations described by high-order dynamics in a wide range of parameters of component agents and impacting interference.

From the automatic control theory, it is known that the introduction of a connection for a given effect does not affect the stability of the system, i.e. the stability conditions are determined only by the characteristic equation of the closed part [24]. To obtain it, it is necessary to equate the denominator of the operator transfer coefficient (characteristic polynomial) to zero like is shown in equation (3).

$$1 + N_2 W(p) = 0, \tag{3}$$

where N_2 is regulation coefficient of the feedback circuit (deviation control), $M_2(p) = W(p)$, $p = d/dt$ is operator.

The device is stable [25]-[26] if all the roots of equation (3) have a negative real part. If equation (3) has at least one purely imaginary root ($p = j\omega$), the formation is on the stability boundary, and the real parts of the other roots must be negative.

Thus, taking p in equation (3) and expressing N_2, we get the coefficient value corresponding to the stability boundary by the equation (4):

$$\begin{aligned} N_2(\omega) &= Re\,[N_2(\omega)] + jIm\,[N_2(\omega)] \\ &= -\frac{1}{M_2(j\omega)} \end{aligned} \tag{4}$$

An arbitrary frequency value ω corresponds to the complex value $N_2(\omega)$. Since the coefficient N_2 is a real number, the condition for the stability boundary of the formation will take the form $Im\,[N_2(\omega)] = 0$. According to equation (4), this condition is met if

$$Im\,[M_2(j\omega_k)] = 0, \tag{5}$$

where ω_k is the critical frequencies (root values corresponding to the stability boundary), k is the root number.

With an arbitrary configuration and formation order, its complex transfer coefficient can be conveniently represented as [27] in equation (6).

$$M_2(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^{I} \alpha_i (j\omega)^i}{\sum_{i=0}^{I} \beta_i (j\omega)^i} \tag{6}$$

The equation (6) was transform in general form for various coefficients α_i, β_i. To do this, the real and imaginary parts were selected in the numerator and denominator of the complex transfer function. In other words, we equate the real and imaginary parts related to the face and the denominator of the right side of the equation (6) with its equivalent on the left side of the same equation:

$$\begin{aligned} A_{1i}(\omega) &= Re\,[A_i(j\omega)] \\ &= \alpha_{4i}\omega^{4i} - \beta_{4i+2}\omega^{4i+2} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} B_{1i}(\omega) &= Re\,[B_i(j\omega)] \\ &= \beta_{4i}\omega^{4i} - \beta_{4i+2}\omega^{4i+2} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} A_{2i}(\omega) &= Im\,[A_i(j\omega)] \\ &= \alpha_{4i+1}\omega^{4i+1} - \alpha_{4i+3}\omega^{4i+3} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} B_{2i}(\omega) &= Im\,[B_i(j\omega)] \\ &= \beta_{4i+1}\omega^{4i+1} - \beta_{4i+3}\omega^{4i+3} \end{aligned} \tag{10}$$

Then (6) taking into considering (7), (8), (9), (10) will take the form of equation (11)

$$M_2(j\omega) = \frac{\sum_{i=0}^{I} [A_{1i}(\omega) + jA_{2i}(\omega)]}{\sum_{i=0}^{I} [B_{1i}(\omega) + jB_{2i}(\omega)]} = \frac{A_1(\omega) + jA_2(\omega)}{B_1(\omega) + jB_2(\omega)} \tag{11}$$

Substituting (7)-(10) and (11) in (5), we get equation (12).

$$\begin{aligned} &\left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i+1}{\omega_k}^{4i+1} - \alpha_{4i+3}{\omega_k}^{4i+3}\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{I} \beta_{4i}{\omega_k}^{4i} - \beta_{4i+2}{\omega_k}^{4i+2}\right) \\ &- \left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i+1}{\omega_k}^{4i+1} - \alpha_{4i+3}{\omega_k}^{4i+3}\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{I} \beta_{4i}{\omega_k}^{4i} - \beta_{4i+2}{\omega_k}^{4i+2}\right) = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

Here the coefficients are further defined by zeros: $\alpha_{i>I}$, $\beta_{i>I} = 0$. The boundary values of $N_2(\omega)$ in (7)-(10) correspond to the roots of equation (12). Further we find these roots.

3. Calculation the polynomial roots of Algorithm

Let's denote the left part of equation (12) as a function $f(\omega)$. The order of the polynomial $f(\omega)$ corresponds to the formation order and is equal to I, the general solution of the polynomial of arbitrary order is absent. We obtain an approximation of $f(\omega)$ based on continuous piecewise linear functions (CPLF) [28]. This allows us to determine the roots of an equation of any order with arbitrary accuracy. Set the following approximation parameters: range from ω_0 to ω_N, N is maximum number of the approximation node, Δ_ω is step, n is current number of the approximation node. The CPLF approximating the polynomial $f(\omega)$ in the interval ω_0-ω_N, takes the form of the equations (13), (14), (15), (16), (17), (18).

$$f_\sum(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n(\omega) Q_n(\omega) \tag{13}$$

$$f_n(\omega) = K_n\omega + L_n \tag{14}$$

$$K_n = \frac{f(\omega_{n+1}) - f(\omega_n)}{\Delta_\omega} \tag{15}$$

$$L_n = f(\omega_n) - K_n\omega_n \tag{16}$$

$$\Delta_\omega = \frac{\omega_N - \omega_0}{N} \tag{17}$$

$$Q_n(\omega) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{\lambda=0}^{1} \sum_{\gamma=0}^{1} (-1)^{\lambda+\gamma} |\omega - \omega_n - \gamma\Delta_\omega + \Delta(1-\lambda)| \tag{18}$$

where $f_n(\omega)$ is the line approximating $f(\omega)$ on the section ω_n–ω_{n+1}, K_n and L_n are approximation coefficients, $Q_n(\omega)$ is inclusion CPLF that forms the approximating segment of a straight line, Δ - an arbitrarily small number, λ and γ are coefficients equal to 0 or 1.

We define the roots in equation (13) as the intersection points of approximating lines $f_n(\omega)$ with the abscissa axis, that is $f_n(\tilde{\omega}_{k\,n}) = 0$

$$\tilde{\omega}_{k\,n} = -\frac{L_n}{K_n}. \tag{19}$$

As a result, we get N roots. To exclude "false" roots $\tilde{\omega}_{k\,n}$, it is enough to multiply equation (19) by $Q_n(\tilde{\omega}_{k\,n})$ to obtain equation (20).

$$\omega_{k\,n} = \tilde{\omega}_{k\,n} Q_n(\tilde{\omega}_{k\,n}) \tag{20}$$

The corresponding inclusion function from "false" roots is zero. The boundary values N_{2k} for each true root are obtained by substituting non-zero values of equation (20) in equation (4), to obtain equation (21).

$$N_{2k} = N_2(\omega_k) = -\frac{1}{M_2(j\omega_k)}. \tag{21}$$

Given the equation (6), we get equation (22).

$$N_{2k} = -\frac{1}{M_2(j\omega_k)} = -\frac{\sum_{i=0}^{I} \beta_i (j\omega_k)^i}{\sum_{i=0}^{I} \alpha_i (j\omega_k)^i} \tag{22}$$

According to equation (22), the values are real. Omitting the imaginary co-operator, we write this expression in the form of the equation (23).

$$N_{2_k} = -\frac{\left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i}{\omega_k}^{4i} - \beta_{4i+2}{\omega_k}^{4i+2}\right)\cdot\left(\sum_{i=0}^{I} \beta_{4i+2}{\omega_k}^{4i+2} - \beta_{4i}{\omega_k}^{4i}\right)\cdot}{\left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i+1}{\omega_k}^{4i+1} - \alpha_{4i+3}{\omega_k}^{4i+3}\right)\cdot\left(\sum_{i=0}^{I} \beta_{4i+3}{\omega_k}^{4i+3} - \beta_{4i+1}{\omega_k}^{4i+1}\right)} \Big/ \left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i}{\omega_k}^{4i} - \beta_{4i+2}{\omega_k}^{4i+2}\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{I} \alpha_{4i+1}{\omega_k}^{4i+1} - \alpha_{4i+3}{\omega_k}^{4i+3}\right)^2 \tag{23}$$

To analyze the stability of a particular variant of the formation of mobile agents, it is necessary to substitute the coefficients of the feedback loop filter (α_i, β_i) in these expressions. The total number of boundary coefficients is determined by the order of the equation (12) and is equal to the filter order of equation (3).

According to [24], a system without feedback is stable if the linear part is stable. Therefore, a system with deviation control ($N_2 = 0$) is stable, that is, the value $N_2 = 0$ belongs to the stability region of the system. Thus, in order to find the boundaries of the stability region of the system, it is necessary to select one negative and one positive value from all the boundary coefficients that are closest to zero. The figure shows the stability area - a segment $N_2^{low} \le N_2 \le N_2^{up}$. The lower border of the region is defined as the maximum of all negative values of , the upper border corresponds to the minimum of all positive values of . Based on the Nyquist frequency criterion using CPLF, an algorithm is proposed (Figure 1), which allows to study stable values of the transmission coefficient of the feedback circuit of a high order.

In general, the stability region is multi-connected, that is, it consists of several segments. In many practical examples [29, 30], the segments of a multi-connected domain are small and can degenerate into points when the coefficients of the characteristic polynomial vary. The choice of scheme parameters in one of these small stable segments can lead to loss of stability when changing these parameters, so it is not acceptable. Thus, stable operation of the formation is guaranteed only in a single-connected region (segment) $N_2^{low} \le N_2 \le N_2^{up}$.

The stability (instability) of the system when fixed $N_2 = N_{2k}^*$ determines the stability (instability) of the segment $N_{2k} \le N_{2k}^* \le N_{2k+1}$ and can be easily checked by the Routh-Hurwitz criterion. This method allows us to calculate the boundary stable values $N_2^{low,up}$ of formations described by

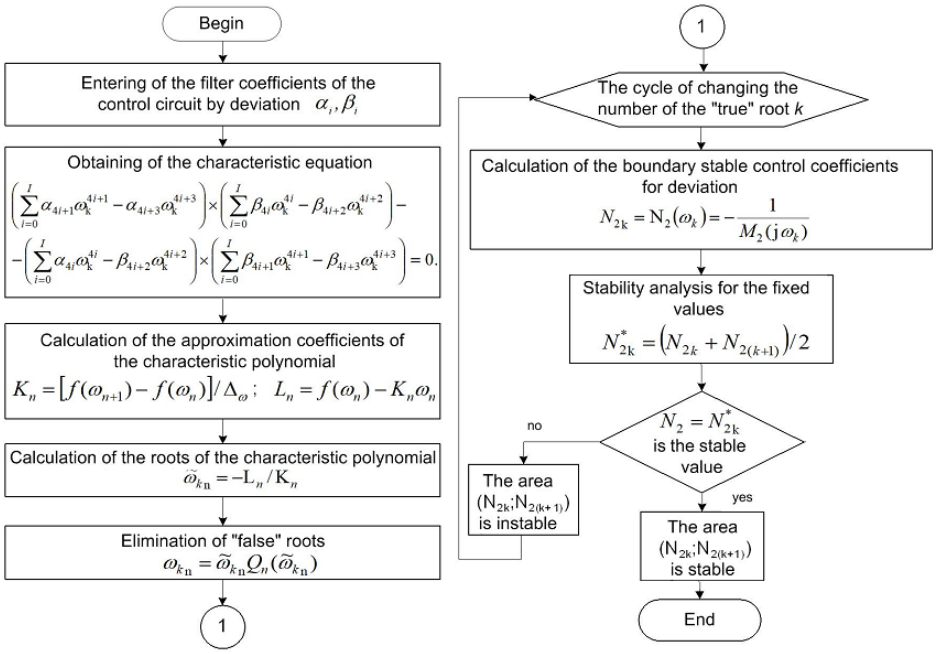


Figure 1: Block diagram of the algorithm for analyzing the parametric stability of mobile agent formations based on the Nyquist criterion and CPLF

high-order dynamics with an arbitrary character of inertia.

4. Results of the computational experiment for stability analysis of formations of mobile agents with the dynamics of a high order and a different nature of inertia

Let's calculate the area of stable operation of the mobile agent formation, whose inertial properties are described by four types of filters: low-pass (LPF), high-pass (HPF), bandpass (BPF) and notch (NRF). LPF and HPF have the order up to the 10th inclusive (I = 1...10), for BPF and NF I = 2, 4, 6, 8, 10. Each LPF and HPF consists of the same first-order filters. The composition of the BPF and the NF is equal to the number of lowpass and highpass filter links of the first order.

Filters' transfer functions have the form of the equations (24), (25), (26) and (27):

$$M_2^{LPF}(p)=\frac{1}{(1+Tp)^I}, \tag{24}$$

$$M_2^{HPF}(p)=\frac{(Tp)^I}{(1+Tp)^I}, \tag{25}$$

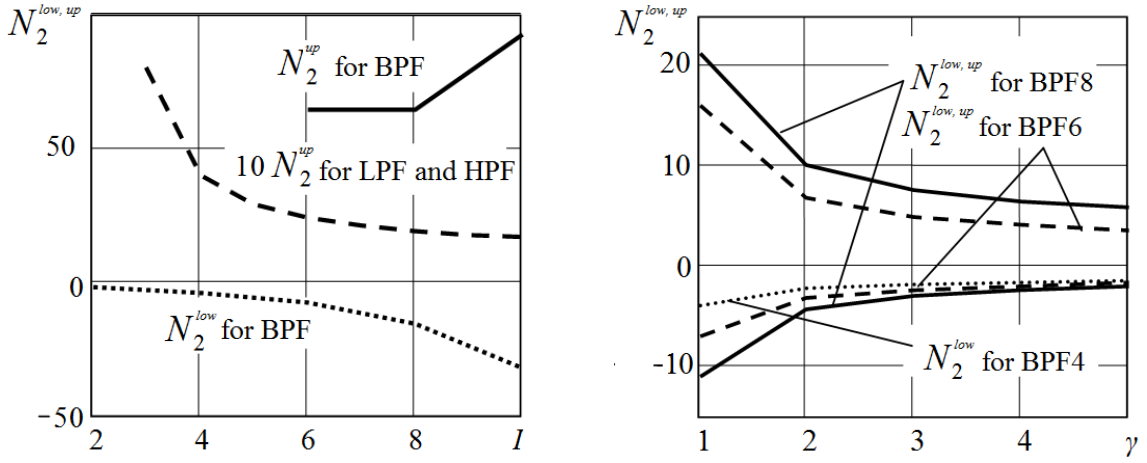
$$M_2^{BPF}(p)=H_{LPF}(p)H_{HPF}(p)=\frac{(\gamma Tp)^{0,5I}}{[(1+Tp)(1+\gamma Tp)]^{0,5I}} \tag{26}$$

$$M_2^{NF}(p)=1-M_2^{BPF}(p) \tag{27}$$

Here, T is the time constant of the LPF and HPF link, γ is the ratio of the constant time of the LPF and HPF links in the BPF and NF. The filter coefficients are determined by the expression of the transfer function for a specific type and order of the filter. The polynomial of the left part of equation (12) is obtained taking into account (7)-(10) for the found values of coefficients. The resulting dependencies are shown in Figure 2.

The lower limit of stability equals to –1 for any order of LPF and LPF (not shown in the figure). For these types of filters, there are no upper boundary values for I=1 and I=2 ($N_2^{up}\to\infty$), and the formation with the inertial characteristic of the LPF or LPF is stable for values $N_2 \geq -1$. As the order increases, the stability area narrows from the top (N_2^{up} decreases).

The stability region of a formation with inertial properties of BPF at $\gamma = 1$ has a different character



(a) Dependences on the order I.

(b) dependences on the parameter γ.

Figure 2: Areas of stability of mobile agent formations with different inertial properties using MATLAB software

(Figure 2a). For values I=2 and I=4, there is no upper bound ($N_2^{up}\to\infty$). As the order increases, the stability area expands both above and below.

The regions of stability of the formation by the inertial properties of BPF of different order for values γ :1–5 are shown in Figure 2b. As can be seen from the figure, when increasing γ and in any order, the stability area narrows both from above and from below. For the NF, N_2^{low} is weakly dependent on the order for any γ, the approximate value $N_2^{low}\approx -1$, and the upper bound is equal to $N_2^{up}\to\infty$ (not shown in the figure).

5. Conclusions

The relevance of the stability analysis of high-order mobile agent formations with variable dynamic parameters for the study of information exchange in UAV networks is noted. A method for analyzing the stability of a formation with an inertial characteristic described by a high-order transfer function with variable coefficients has been developed. The new approach is based on the use of the Nyquist time criterion and a piecewise linear approximation of the hodograph of the transfer function of the formation. A computational experiment was performed to analyze the stability of a mobile agent formation whose inertial properties are described by four types of filters of different orders: low-pass, high-pass, band-pass, and notch filters from the 1st to the 10th order inclusive. The calculated boundaries of the formation stability regions were verified using the Routh-Hurwitz criterion and the D-partition method. In contrast to the Routh-Hurwitz test, the developed method does not require solving a system of inequalities to study the parametric stability of the system; it also does not require constructing a hodograph or boundary curves.

Acknowledgments

The work was supported by RFBR grant 19-29-06030-MK “Research and development of wireless ad-hoc network technology between UAVs and smart city dispatch centers based on adaptation of transmission mode parameters at different levels of network interaction”. The theory was prepared in the framework of the state task FZWG-2020-0029 “Development of theoretical foundations for building information and analytical support for telecommunication systems for geo-ecological monitoring of natural resources in agriculture”.

6. References

[1] R. Burns, C. McLaughlin, J. Leitner, and M. Martin, “TechSat21: Formation design, control, and simulation,” in *2000 IEEE Aerospace Conference.*

Proceedings (Cat. No.00TH8484). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2000, pp. 19–25.

[2] W. H. Clohessy and R. S. Wiltshire, "Terminal guidance system for satellite rendezvous," *Journal of the Aerospace Sciences*, vol. 27, no. 9, pp. 653–658, 1960.

[3] H. H. Yeh, E. Nelson, and A. Sparks, "Nonlinear tracking control for satellite formations," *Journal of Guidance, Control, and Dinamics*, vol. 25, no. 2, pp. 376–386, 2002.

[4] L. E. Buzogany, M. Pachter, and J. J. D'Azzo, "Automated control of aircraft in formation flight," in *Proceedings of the AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control*, Monterey,CA,U.S.A., 1993, pp. 1349–1370.

[5] F. Giuletti, L. Pollini, and M. Innocenti, "Autonomous formation flight," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, no. 6, pp. 34–44, 2000.

[6] J. D. Wolfe, D. F. Chichka, and J. L. Speyer, "Decentralized controllers for unmanned aerial vehicle formation flight," in *Proceedings of AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control*, San Diego,CA,U.S.A., 1996.

[7] J. G. Bender, "An overview of systems studies of automated highway systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 82–99, 1991.

[8] S. E. Shladover, "Automatic vehicle control developments in the PATH program," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 114–130, 1991.

[9] S. Darbha and J. Hedrick, "Constant Spacing Strategies for Platooning in Automated Highway Systems," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme - J DYN SYST MEAS CONTR*, vol. 121, no. 3, pp. 462–470, 1999.

[10] J. Fax and R. Murray, "Information Flow and Cooperative Control of Vehicle Formations," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1465–1476, 2004.

[11] A. V. Proskurnikov, "Frequency-domain criteria for consensus in multiagent systems with nonlinear sector-shaped couplings," *Automation and Remote Control*, vol. 75, no. 11, pp. 1982–1995, 2014.

[12] N. Chopra and M. W. Spong, *Advances in robot control*. Berlin: Springer-Verlag, 2006, ch. Passivity-based control of multi-agent systems, pp. 107–134.

[13] M. Arcak, "Passivity as a Design Tool for Group Coordination," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 8, pp. 1380–1390, 2007.

[14] B. R. Andrievsky, A. S. Matveev, and A. L. Fradkov, "Management and evaluation under information constraints: towards a unified theory of control, computation, and communication," *Automatics and telemechanics*, vol. 4, pp. 34–99, 2010.

[15] B. R. Andrievsky and A. L. Fradkov, "Control and monitoring through communication channels with limited bandwidth," *Gyroscopy and navigation*, vol. 4, no. 67, pp. 103–114, 2009.

[16] L. Bazzi and S. Mitter, "Endcoding complexity versus minimum distance," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2103–2112, 2005.

[17] V. Bondarko, "Stabilization of linear systems via a two-way channel under information constraints," *Cybernetics and Physics*, vol. 3, no. 4, pp. 157–160, 2014.

[18] G. Goodwin, K. Lau, and M. Cea, "Control with communication constraints," in *12th International Conference: Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012*, 2012, pp. 1–10.

[19] G. Nair, R. Evans, I. Mareels, and W. Moran, "Topological feedback entropy and nonlinear stabilization," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1585–1597, 2004.

[20] G. Nair, F. Fagnani, S. Zampieri, and R. Evans, "Feedback control under data rate constraints: an overview," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 108–137, 2007.

[21] K. S. Amelin, B. R. Andrievsky, S. I. Tomashevich, and A. L. Fradkov, "Data transfer with adaptive encoding between quadrocopters in formation, UBS, 62 (2016), 188-213," *Autom. Remote Control*, vol. 80, no. 1, pp. 150–163, 2019.

[22] I. A. Kurilov, *Radio Engineering and telecommunication systems*, 2012, ch. Research on the stability of a signal converter based on continuous piecewise linear functions, pp. 4–7.

[23] G. S. Vasilyev, I. A. Kurilov, and S. M. Kharchuk, "Analysis of parametrical stability of the amplitude-phase converter with various filters," in *International Siberian ConferenceControl and Communications (SIBCON) 2013*, Krasnodar, 12-13 September 2013.

[24] G. Zaitsev, V. Bulgach, and G. Radzivilov, "Modeling of Combined Tracking Systems under Random Setting Action," *Journal of Automation and Information Sciences - J AUTOMAT INF SCI*, vol. 37, pp. 22–25, 2005.

[25] I. S. Gonorovsky, *Radio engineering circuits and signals. textbook for universities*, 2nd ed. Moscow: Soviet radio, 1971.

[26] M. M. Postnikov, *Stable polynomials*. Moscow: Nauka, 1981.

[27] I. A. Kurilov, "Research of static modes of signal converters under internal perturbations," in *Questions of Radioelectronics*, I. A. Kurilov, G. S. Vasiliev, and S. M. Kharchuk, Eds. Series: General Technical, 2010, no. 1.

[28] I. A. Kurilov, "Study of stability of a signal converter based on continuous piecewise linear functions," in *Radio Engineering and telecommunication systems*, I. A. Kurilov, G. S. Vasilyev, S. M. Kharchuk, and D. I. Surzhik, Eds. Series: General Technical, 2012, no. 12, pp. 2–40.

[29] E. N. Gryazina, "Current state of the D-partition method," in *Automatics and telemechanics*, I. A. Kurilov, G. S. Vasilyev, S. M. Kharchuk, and D. I. Surzhik, Eds. Series: General Technical, 2008, no. 1, pp. 4–7.

[30] E. N. Gryazina, "On the theory of D-partition," in *Automatics and telemechanics*, 2004, no. 12, pp. 15–28.

Tech Note: Study of led filament lamp parameters (Trademark general lighting systems)

O. E. Zheleznikova *,[a], Yu. A. Zhuravleva [b], S. A. Mikaeva [b],

[a]*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Republic of Mordovia*

[b]*MIREA (Moscow Institute of Radio, Electronics and Automatics)- Russian Technological University, Central Federal District, Moscow, Russia*

Abstract.- The article describes the results of electrical, light and spectrocolorimetric parameter measurements of LED filament lamps (LEDFL) with the power of 10 and 13 W (the trademark General Lighting Systems). LEDFL parameters were measured at the "Lighting Engineering Metrology" Collective Use Center of Mordovia State University named after N. P. Ogaryov using GO-2000A goniophotometer (Everfine, China) and Specbos 1211 spectroradiometer (Jeti, Germany). The comparative analysis of the studied LEDFL and general-purpose incandescent lamp (GPL) parameters was performed. The studied LEDFL is advisable to use for lighting public, administrative buildings and residential premises for direct replacement of GPL.

Keywords: LED filament lamp; incandescent lamp; light intensity curve; luminous flux; general color rendering index, radiation spectrum.

Nota técnica: Estudio de los parámetros de lámparas de filamento LED (Sistemas de iluminación general de marcas comerciales)

Resumen.- El artículo describe los resultados de las mediciones de parámetros eléctricos, de luz y espectrocolorimétricos de las lámparas de incandescencia LED (LEDFL) con una potencia de 10 y 13 W (la marca registrada General Lighting Systems). Los parámetros LEDFL se midieron en el Centro de Uso Colectivo "Lighting Engineering Metrology" de la Universidad Estatal de Mordovia que lleva el nombre de N. P. Ogaryov utilizando un goniófotómetro GO-2000A (Everfine, China) y un espectrorradiómetro Specbos 1211 (Jeti, Alemania). Se realizó el análisis comparativo de los parámetros estudiados de LEDFL y la lámpara de incandescencia de uso general (GLP). Demostrando que es aconsejable el reemplazo de la lámpara de incasdecencxia GLP por la LEDFL para alumbrado público, edificaciones administrativas y residenciales.

Palabras clave: Lámpara de filamento LED; lámpara incandescente; curva de intensidad de luz; flujo luminoso; índice de reproducción cromática general.

Received: May 28, 2020.
Accepted: July 06, 2020.

1. Introduction

In the context of modern globalization, decision-making on the development of LED light source (LED LS) production should be determined not only by the requirements of their energy efficiency, but also by other aspects: economic, social and environmental.

The LED filament lamp is a modern light source (LS), combining the advantages of incandescent and LED LS, the luminous efficiency of which is currently 150–160 lm/W, and in laboratory samples it has already exceeded 300 lm/W with the service life of 50 thousand hours and above. At the same time, the use of LED LS makes it possible to control the light and colorimetric characteristics of radiation, which opens up the prospects for a dynamic ergonomic light-color medium development [1, 2, 3].

The works described the studies devoted to the analysis of parameters, the assessment of LEDFL

* Correspondence author:
*e-mail:*satstf@mail.ru (O.E. Zheleznikova)

lighting quality and effectiveness [4, 5, 6, 7, 8].

Table 1 presents the comparative analysis of LEDFL from various manufacturers.

2. Methodology

To measure the light intensity curve (lic) of the studied LEDFL with the powers of 10 and 13 W and GPL with the power of 60 W (comparison lamp), they used the measurement method with GO 2000-A goniophotometer in accordance with GOST R 55702-2013 [9]. The stabilization time of the LS light parameters was at least 5 min after their inclusion to the rated voltage network. The center of the receiving surface of the photometric head was on a straight line passing through the photometric center of the goniophotometer, and its plane was perpendicular to this straight line. The measurement results were processed depending on the nature of the light distribution symmetry of the LS and the adopted photometric system. The processing consisted in obtained light intensity averaging for the meridional planes symmetrically located relative to the axes or planes of the lighting device symmetry [10].

To measure the spectrocolorimetric parameters of the above mentioned LS, they used the measurement method with a spectroradiometer [9].

Also this work used special scientific methods: measurement result comparison, computer simulation method, mathematical statistics methods for measurement result processing.

3. Results and discussion

The parameters of the studied lamps, measured at the voltage of 220 V, are shown in Table 2.

The analysis of the results showed that the power of the studied LS does not correspond to the declared by the manufacturer (it is 30 % less ON AVERAGE for LEDFL, and 3,3 % for GPN). As for the luminous parameters, the following can be stated here: the luminous flux of LEDFL exceeds the luminous flux of GPN by 25 % at least, and the luminous efficiency of LEDFL is more than 1 order higher as compared to GPN.

Figure 1 shows the lic of the studied LS.

Table 3 shows the spectral and colorimetric parameters of LEDFL and GPN.

The analysis of the obtained lic showed that the LEDFL lic significantly differ from the GPN lic. The luminous flux of LEDFL is directed mainly perpendicular to the optical axis of the lamp, and the lic can be characterized as sinus. Lic is closer to uniform among GPN. That is, the main difference is in the area along the optical axis of the lamp: in contrast to GPN, LEDFL almost do not emit light flux in this direction. The spectral radiation distributions of the studied LSs are presented in Figure 2.

LEDFL spectra are characterized by the presence of two maxima. One is in the blue region of the spectrum and is caused by LED crystal glow, the second is in the yellow-orange region and is provided by luminophor glow. The spectral distributions of the studied LEDFL are almost identical, the difference is observed only in the glow region of LED crystals, which can be explained by technological errors or by different crystal use to generate radiation. Comparing the colorimetric parameters of the studied lamps, the following can be noted:

- the correlated color temperature Tcv of the studied LSs is almost the same;
- LEDFL have common color rendering index Ra of more than 80.

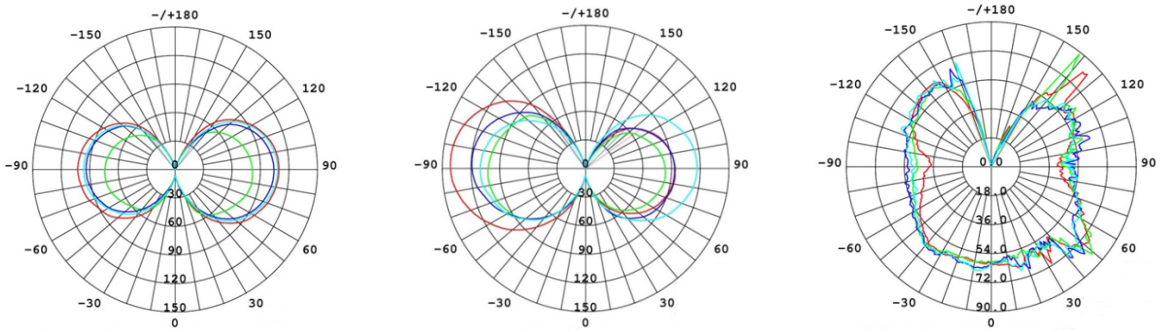
4. Summary

Thus, the results of this work allowed us to conclude that the studied LEDFL can be used for general lighting of public buildings and communal premises of residential buildings, namely:

- when they perform visual work of A-B grades associated with object distinguishing of low requirements for color differentiation with illumination of E = 150 - 300 lux;
- when they perform visual work of Г- ЖК grades during colored object distinguishing with low requirements for color differentiation or without requirements for color rendering at E = 150 - 300 lux.

Table 1: Comparison of LEDFL characteristics from various manufacturers

Lamp brand (manufacturer)	Declared power (W)	Luminous flux (lm)	GPL analog (W)	Service life (h)
Maxus filament A60	8	800	60	30000
VIDEX Neo Classic (Filament) A60FA 2200K	7	630	55	40000
Philips LED Classic A60 WW CL D APR	7,5	806	70	15000
OSRAM LED RF CL A60 2700?	6	806	75	15000
Lisma SDF 8 W	8	780	75	30000
«Tomicha» lamp SA 220-8	8	800	75	15000



(a) FL 10W. (b) FL 13W. (c) IL 60W.

Figure 1: LEDFL and GPN light intensity curves

Table 2: Parameters of LEDFL and GPL

Measured characteristics	FL 10 W	FL 13 W	IL 60 W
Power, (W)	7	8	58
Luminous flux, (lm)	876	994	658
Luminous intensity, max., Cd	109,9	143,0	92,3
Luminous efficiency, (lm/W)	131,7	133,6	11,43

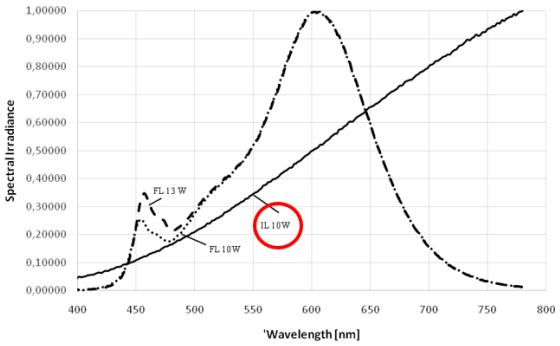


Figure 2: Spectral distribution of the studied lamp radiation

5. Conclusions

The performed work revealed that at much lower LED power, 6 and 4.6 times less than GPN, respectively, the luminous flux of LED LS is 1,3 and 1,5 times higher, respectively than the GPN luminous flux. The luminous efficiency of LEDFL is 11,55 times higher on average than the luminous efficiency of GPN.

They determined that the colorimetric parameters of LEDFL make it possible to use these LEDs for general lighting of public buildings and residential premises.

The spectral distributions of the studied LEDFLs are almost identical; the difference is observed

Table 3: Spectral and colorimetric parameters of the studied lamps

Parameters	FL 10W	FL 13W	IL 60W
Illuminance [lx]	$3{,}99 \times 10^2$	$4{,}79 \times 10^2$	$1{,}43 \times 10^2$
Irradiance [W/sqm] (380-780nm)	1,20	1,46	$9{,}49 \times 10^{-1}$
Correlated Colour Temp. (CCT) [K]	2662	2713	2720
Dominant Wavelength (DWl) [nm]	583,2	583,6	584
Colour Purity (PE) [%]	68,7	63,5	61,3
R_a	80,14	81,49	99,64
Peak Wavelength [nm]	602	607	892
PEAK FWHM [nm]	110,2	110,4	405
Centroid Wavelength [nm]	591,6	589,3	786,8

only in the region of LED crystal glow. The dominant wavelength in the emission spectra of all the studied lamps is practically the same. The peak wavelengths in the LEDFL emission spectra are in the same region (607 and 602 nm); the peak wavelength for GPN is outside the boundaries of the visible spectrum.

The curves of LEDFL light intensity significantly differ from GPN lic. In LEDFL, lic can be characterized as sinus, in GPN lic has the shape close to uniform.

The analysis of the LEDFL parameters of the General Lighting Systems trademark made it possible to determine their areas of application. Further studies of these promising LS parameters will make it possible to develop recommendations to improve the norms and standards in the field of artificial lighting. Research materials can be used by the sanitary-hygienic departments and technical regulatory authorities.

6. References

[1] D. Starosek, A. Khomyakov, K. Afonin, Y. Ryapolova, and V. Tuev, "Dependence on gas of the thermal regime and the luminous flux of LED filament lamp," in *AIP Conference Proceedings Prospects of fundamental sciences development: proceedings of the XIII international conference of students and young scientists aip conf. Proc.*, 2016, pp. 1551–7616.

[2] W. Feng, B. Feng, F. Zhao, B. Shieh, and R. Lee, "Simulation and Optimization on Thermal Performance of LED Filament Light Bulb," in *Proceedings of the 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA-2015)*, vol. 12, 2015, pp. 88–92.

[3] J. Liu, C. Xu, H. Zheng, and S. Liu, "Numerical analysis and optimization of thermal performance of LED filament light bulb," in *IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2017, pp. 2243–2248.

[4] R. M. Menumerov, "Light environment as the factor of safety and occupational health. Man-Nature-Society: Theory and Practice of Life Safety," *Ecology and Valeology*, vol. 5, no. 12, pp. 148–150, 2019.

[5] O. E. Zheleznikova, I. V. Blentsov, O. S. Voynova, S. N. Ageev, and M. S. Dzhuma, "Study of the Lighting Conditions Created by the Second Generation Led Light Sources," *Helix*, vol. 9, no. 2, pp. 4878–4882, 2019.

[6] R. K. Tukshaitov, "On the characteristic of the luminous flux reduction among LED filament lamps of different power after they are turned on," *Practical Power Electronics*, vol. 2, pp. 49–52, 2018.

[7] R. Tukshaitov and M. Gusmanov, "Typical and filament LED lamps. The methods of their quality evaluation," *Semiconductor lighting*, vol. 5, pp. 32–35, 2018.

[8] R. P. Pfeifer, "Comparison Between Filament Lamps and Compact Fluorescent Lamps," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, pp. 8–14, 1996.

[9] R. Gost, "Electric light sources. The methods of electrical and light parameter measuring. - Introduc." Standartinform, Moscow, Tech. Rep., 2013.

[10] C. Xu, Z. Zhang, and J. Chu, "Thermal dissipation enhancement of LED filament bulb by ionic win," in *17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 2016, pp. 1212–1215.

Tech note: Analogy between the ventricular volume and the charge and discharge of a condenser

Aleida Cantor-Rudas *

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- To establish the analogy of a biological system and a physical system, such as the ventricular volume and the charge and discharge of a capacitor, we proceeded to select from the succession of waves in the ECG record, three processes of the cardiac cycle that establish similarity. Firstly, the cardiac output was identified as the time constant that indicates the volume of blood ejected from the heart per unit of time, this constant in the physical process is the parameter that provides information of its variables as voltage or current in the charge phase or download. Consequently, the analysis of this process provides information regarding the behavior of the ventricular volume and its control through similar systems, such as the loading and unloading of a capacitor. In conclusion, a physical system and a biological system present analogies in their behavior, which is described qualitatively and quantitatively through a mathematical equation that allows to relate the variables that intervene in the phenomenon under study.

Keywords: heart rate; cardiac output; ventricular volume; analysis by analogy.

Nota técnica: Analogía entre el volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador

Resumen.- Para establecer la analogía de un sistema biológico y un sistema físico, como el volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador se procedió a seleccionar de la sucesión de ondas en el registro del electrocardiograma (ECG), tres procesos del ciclo cardíaco que establecen semejanza. Primeramente, se identificó el gasto cardíaco como la constante de tiempo que indica el volumen de sangre expulsada del corazón por unidad de tiempo, esta constante en el proceso físico es el parámetro que proporciona información de sus variables como voltaje o corriente en la fase de carga o descarga. En consecuencia, el análisis de este proceso proporciona información respecto al comportamiento del volumen ventricular y su control a través de sistemas semejantes, como es el caso de la carga y descarga de un condensador. En conclusión, un sistema físico y un sistema biológico presentan analogías en su comportamiento, el cual es descrito cualitativamente y cuantitativamente a través de una ecuación matemática que permite relacionar las variables que intervienen en el fenómeno en estudio.

Palabras clave: frecuencia Cardíaca; volumen ventricular; análisis por analogía.

Recibido: 26 de mayo, 2020.
Aceptado: 23 de julio, 2020.

1. Introducción

La necesidad de contar con herramientas que permitan registrar y analizar las secuencias de imágenes provenientes de un equipo de videoangiografía, originó investigaciones que aportaron el diseño e implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de imágenes angiográficas, que adicionalmente permite la evaluación de la función ventricular, mediante la estimación de parámetros asociados a la misma, Esta visualización invasiva se obtiene mediante imágenes de rayos X obtenidas luego de la inyección de un producto de contraste radio opaco en la estructura anatómica [1].

Es sorprendente visualizar los sistemas biológicos y físicos en sus comportamientos gráficos y encontrar analogías en las trayectorias en rangos específicos. Se entiende por sistema biológico al sistema de órganos y tejidos en el humano y sistema físico, como una conexión o interacción o modelo matemático de tipo causal. Lo primero

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*aleidacant@hotmail.com (A. Cantor-Rudas)

que se plantea por añadidura son las ecuaciones matemáticas del fenómeno físico y su gráfica para comparar el lugar geométrico del sistema biológico con sus respectivas variables.

1.1. Descripción del ciclo cardiaco

En esta oportunidad, se presenta la analogía entre el volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador. Para esto, se describe el proceso de diástole y sístole del corazón en su ciclo cardiaco con sus respectivas gráficas para posteriormente presentar una descripción de la gráfica seleccionada, como es la del volumen ventricular y la gráfica de la carga y descarga del condensador desde un análisis cualitativo y cuantitativo los cuales se indican en la Figura 1.

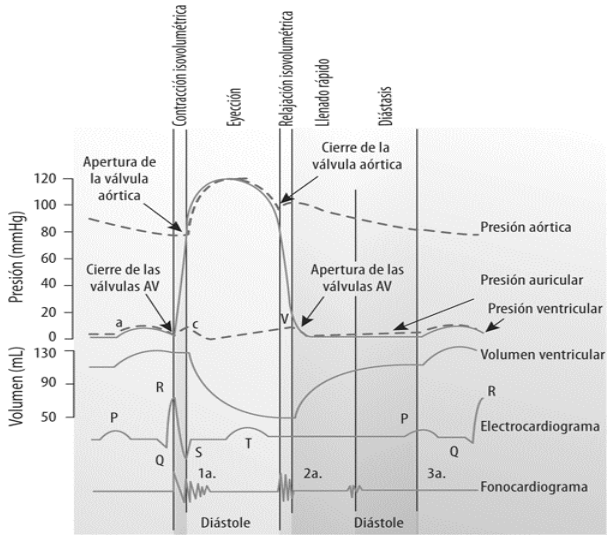


Figura 1: Gráficas de presión, volumen, electrocardiograma y fonocardiograma para el ciclo cardiaco [4]

1.1.1. Proceso de diástole y sístole

El sistema biológico de estudio presenta siete eventos: sístole auricular, contracción isovolumétrica, eyección rápida, eyección reducida, relajación isovolumétrica, llenado ventricular rápido y diástasis [2] de los cuales se seleccionaron tres por presentar semejanza con el sistema físico en la etapa de carga y descarga. Estos eventos son los siguientes: contracción isovolumétrica, eyección rápida, y relajación isovolumétrica. En el estudio de cada proceso de diástole y sístole en el corazón, se señalan entonces las gráficas de presión, volumen y el electrocardiograma (ECG) [2].

1.1.2. Contracción isovolumétrica

En el comienzo de la sístole, las válvulas auriculoventriculares (AV) del corazón se cierran. Eléctricamente la sístole ventricular se define como el intervalo entre el complejo QRS y el final de la onda T (el intervalo Q-T). Mecánicamente, la fase isovolúmica de la sístole ventricular se define como el intervalo entre el cierre de las válvulas AV y la apertura de las válvulas semilunares (válvulas aórtica y pulmonar).

En cuanto a las presiones y volumen, las válvulas AV se cierran cuando la presión en los ventrículos excede la presión en las aurículas. A medida que los ventrículos se contraen isovolumétricamente, su volumen no cambia. La presión interna aumenta, acercándose a la presión en la aorta y las arterias pulmonares. En el ECG, el impulso eléctrico se propaga desde el nodo AV a través del paquete de His y el sistema de Purkinje para permitir que los ventrículos se contraigan desde el vértice del corazón hacia la base. El complejo QRS se debe a la despolarización ventricular y marca el comienzo de la sístole ventricular.

1.1.3. Eyección rápida

En el corazón, las válvulas semilunares (aórtica y pulmonar) se abren al comienzo de esta fase de la sístole ventricular. Mientras los ventrículos continúan contrayéndose, la presión en los ventrículos excede la presión en la aorta y las arterias pulmonares; las válvulas semilunares se abren, la sangre sale de los ventrículos y el volumen en los ventrículos disminuye rápidamente. A medida que ingresa más sangre a las arterias, aumenta la presión hasta que el flujo de sangre alcanza su punto máximo. La onda “c” de presión auricular normalmente no es discernible en el pulso venoso yugular. La contracción del ventrículo derecho empuja la válvula tricúspide dentro de la aurícula y aumenta la presión auricular, creando una pequeña onda en la vena yugular. Normalmente es simultáneo con el pulso carotídeo.

1.1.4. Relajación isovolumétrica

El comienzo de la diástole en el corazón, las válvulas AV están cerradas. La aurícula en diástole se ha estado llenando de sangre en la parte superior de la válvula AV cerrada, causando que la presión auricular aumente gradualmente. La onda "v" se debe al flujo inverso de sangre después de que golpea la válvula AV cerrada. Es la segunda onda discernible del pulso venoso yugular. La presión en los ventrículos continúa bajando. El volumen ventricular es mínimo y está listo para llenarse nuevamente con sangre.

2. Metodología

Descrito el proceso de diástole y sístole para el volumen ventricular del sistema biológico, se procedió a comparar con un sistema físico como el proceso de carga y descarga de un condensador. Se observa que la gráfica del volumen ventricular, presenta semejanza con las gráficas del sistema físico. Para comprobar esta observación, se formuló estadísticamente como una hipótesis, para luego aplicar una prueba de Chi Cuadrado con los datos de las señales del electrocardiograma en las gráficas del volumen ventricular teóricas y se relacionaron con las gráficas obtenidas con los datos de un electrocardiograma de un experimento con radiación de colores [3] con las que se obtuvo nuevamente el volumen ventricular con las ecuaciones del sistema físico.

2.1. Analogía cualitativa del volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador

Primeramente el condensador se comporta en dos condiciones, en el proceso de carga cuando se encuentra descargado es un corto circuito y en el proceso de descarga está totalmente cargado es un circuito abierto o una fuente de voltaje. Existen dos conexiones para un circuito *RC*, en serie o paralelo, como se muestra en la Figura 2 y la Figura 3 [4].

Estas conexiones se han presentado como modelos del sistema cardiovascular, donde se asume un flujo estacionario o permanente [5], a diferencia a esta investigación que se presenta el régimen transitorio de los procesos descritos de diástole y sístole en el caso del volumen ventricular.

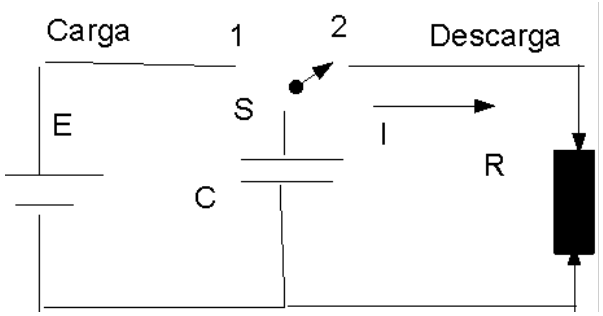


Figura 2: Conexión serie

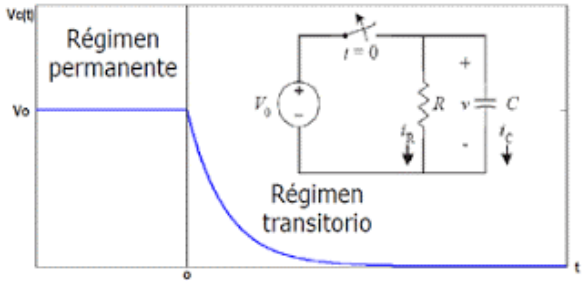


Figura 3: Conexión paralelo

En las Figuras 2, 3 y 4 se observan los procesos de carga y descarga del condensador en su régimen transitorio [4], se comparan con las tres fases del volumen ventricular [2] descritas anteriormente para obtener los siguientes hallazgos:

1. En la contracción isovolumétrica, la sangre sale por la aorta y arteria pulmonar, y el volumen permanece constante, como se visualiza en la Figura 1. La gráfica de volumen se asemeja a la carga del condensador y se observa que el volumen se ubica en la parte final del proceso de carga, donde el voltaje es constante, de acuerdo con la Figura 3 y la Figura 4. En esta fase ocurre que, la sangre sale del corazón y su volumen permanece constante, como se indicó anteriormente, por lo que se puede decir que se inicia el proceso de descarga. En la fase de eyección rápida, los ventrículos continúan en contracción y la sangre en su proceso de salida por la aorta y la arteria pulmonar, evidenciándose un descenso en el volumen como se observa en la Figura 1, lo cual tiene semejanza con el proceso de descarga del condensador.

2. En la fase de relajación isovolumétrica, los ventrículos están en contracción o cerrados, la sangre continúa saliendo por la aorta y la arteria pulmonar y entra por el atrium simultáneamente.

El volumen se encuentra en la fase de descarga del condensador, en la fase final de esta, como se observa en la Figura 4 [4].

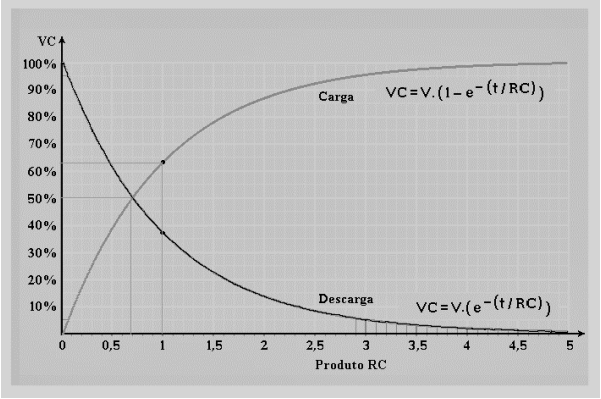


Figura 4: Carga y descarga de un condensador. Conexión serie [4].

2.2. *Analogía cuantitativa del volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador. Ecuaciones matemáticas*

En las ecuaciones de carga y descarga de un condensador se observa que cuando el parámetro τ alcanza una magnitud equivalente a RC, representa la constante de tiempo que tarda en cargarse y descargarse el condensador [4] (Figura 4). Estas gráficas representadas en papel milimetrado corresponden a el lugar geométrico de las funciones matemáticas denominadas exponenciales de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2). Así mismo este lugar geométrico también puede ser representado en papel semi logarítmico, obteniéndose una función lineal o recta cuya pendiente es la constante de tiempo τ [6].

$$v_c = v_0 \cdot e^{\frac{-\tau}{RC}} \tag{1}$$

$$v_c = v_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-\tau}{RC}}\right) \tag{2}$$

Para realizar una comparación entre el sistema físico y biológico, esta constante se relaciona con el gasto cardiaco, definido como el volumen de sangre expulsada por unidad de tiempo, lo que justamente ocurre en el proceso biológico descrito anteriormente. El gasto cardiaco se define como el producto de la frecuencia cardiaca (latidos/min) y el volumen por latido (mL). Para una frecuencia cardiaca de 70 latidos/min y un volumen de 70 mL, el gasto cardiaco es igual a 5 L/min, este es el idóneo para un sistema biológico normal.

En el sistema físico, los valores de R y C se seleccionan para obtener gráficas con diferentes pendientes de rectas que indican la descarga del condensador [6]. Para este estudio, se tomaron los datos de pulso/min recolectados en otra investigación [3] y se calculó el gasto cardiaco para cada ítem, considerando el valor de volumen inicial de $V = 130$ mL de la Figura 1 y se aplicaron la ecuaciones (1) y (2), de carga y descarga de un condensador (VC), obteniéndose los resultados del volumen ventricular para los tres procesos estudiados: contracción isovolumétrica, eyección rápida y relajación isovolumétrica, los cuales se muestran en las Tablas 1, 2 y 3 respectivamente, y se visualizan gráficamente por medio de las Figuras 5, 6 y 7.

Tabla 1: Comportamiento del volumen ventricular en la etapa de Contracción isovolumétrica

Frecuencia cardiaca (pulso/min)	tiempo (s)	Volumen ventricular VV (L)
65	0	0
64	0,1	0,07
66	0,2	0,1
65	0,3	0,11
66	0,4	0,12
64	0,5	0,13
65	0,6	0,13
64	0,7	0,13
66	0,8	0,13

Gasto cardiaco (L/seg) = 0,14

Al comparar las Figuras 1, 4 y 5 se verifica que presentan semejanza en cuanto al lugar geométrico que controla a los dos sistemas. En la Figura 1 se visualiza la etapa final del proceso de carga del condensador, como se mencionó anteriormente.

En la Figura 1, 4 y 6 se observa el proceso de descarga del condensador, el cual se visualiza parte de su recorrido.

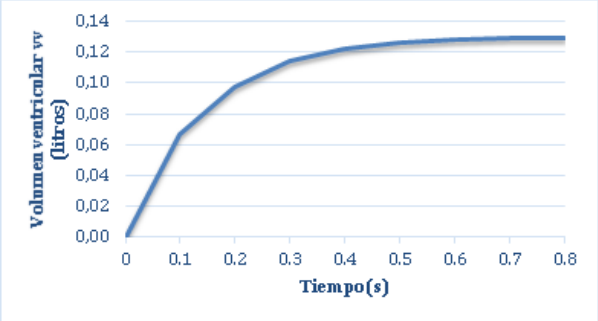


Figura 5: Gráfica de Volumen (proceso de Carga)-contracción isovolumétrica

Tabla 2: Comportamiento del volumen ventricular en la etapa de Eyección rápida

Frecuencia cardiaca (pulso/min)	tiempo (s)	Volumen ventricular VV(L)
66	0	0,13
64	0,1	0,06
65	0,2	0,03
65	0,3	0,02
65	0,4	0,01
63	0,5	0
66	0,6	0
64	0,7	0
65	0,8	0

Gasto cardiaco (L/seg) = 0,14

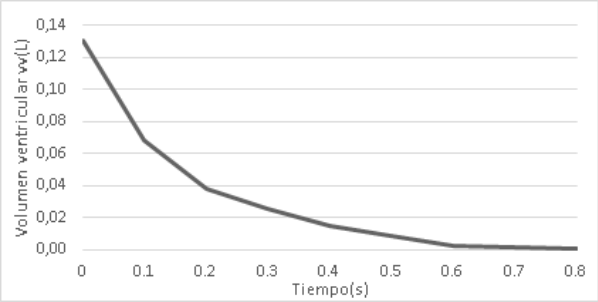


Figura 6: Gráfica de Volumen (proceso de descarga). Eyección rápida

En la Figura 1, 4 y 7 se observa la etapa final del proceso de descarga, y se evidencia que se dará inicio al proceso de carga.

2.3. *Analogía de la señal del electrocardiograma (ECG)*

Para validar la analogía del comportamiento de las gráficas del volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador, se utilizó la ecuación

Tabla 3: Comportamiento del volumen ventricular en la etapa Relajación isovolumétrica

Frecuencia cardiaca (pulso/min)	tiempo (s)	Gasto cardiaco (L/seg)	Volumen ventricular VV(L)
68	0	0,15	0,13
71	0,1	0,15	0,07
74	0,2	0,16	0,04
85	0,3	0,18	0,03
84	0,4	0,18	0,01
86	0,5	0,19	0,01
68	0,6	0,15	0
71	0,7	0,15	0
74	0,8	0,16	0

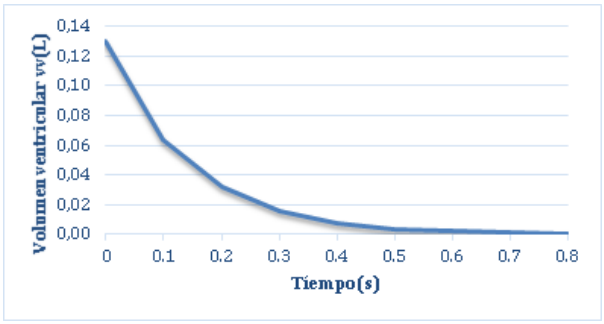


Figura 7: Gráfica de Volumen (proceso de descarga). Relajación isovolumétrica

del voltaje del condensador en función del tiempo en la fase de carga y de descarga para generar las gráficas ya establecidas o conocidas (Figura 4). De la misma manera, se procedió a interpretar las señales registradas en el electrocardiograma en la Figura 1 en los eventos seleccionados del proceso de diástole y sístole y las fases de carga y descarga del condensador.

Se tomaron los datos de frecuencia cardíaca (pulso/min) de la Tabla 1 [3] en función del tiempo de duración del ciclo cardíaco de las gráficas de volumen ventricular. Verificando que la imagen del ECG del lapso RS de la contracción isovolumétrica y el ciclo de carga del condensador con el volumen ventricular se asemejan como se evidencia en las Figuras 1, 4 y 8. paralelamente, en las Figuras 1, 4 y 9 se observa el lapso ST del ECG y el comienzo del ciclo de descarga del condensador en la gráfica del volumen ventricular.

Comparando la Figura 1 y Figura 4 con la

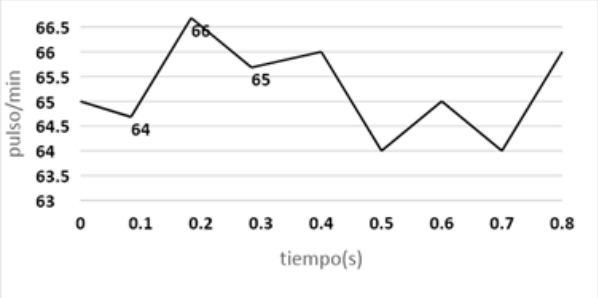


Figura 8: Ritmo cardiaco *RS*

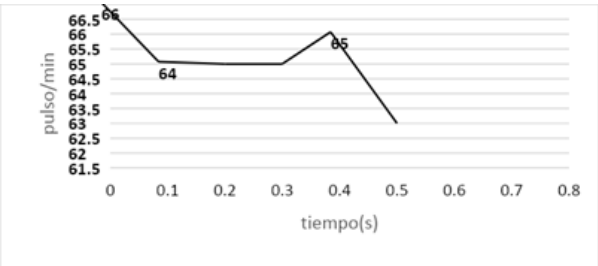


Figura 9: Ritmo cardíaco *ST*

Figura 10 se observa el lapso U del ECG y la finalización del ciclo de descarga y el inicio del ciclo de carga del condensador en la gráfica del volumen ventricular.

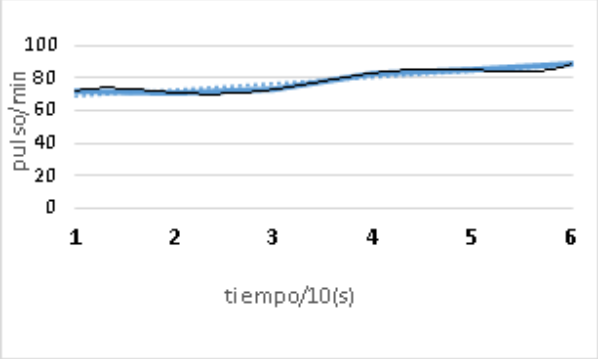


Figura 10: Ritmo cardíaco U

3. Discusión de resultados

Se emplearon tres métodos para verificar el comportamiento del volumen ventricular y la carga y descarga del condensador para así establecer la analogía cualitativa, cuantitativa y la señal del ECG generada para cada proceso del sistema biológico ene estudio. Los datos de frecuencia cardíaca utilizados [3] cumplieron con las disposiciones del Código de Ética para la Vida [7] y la teoría de muestreo [8]. Con estos datos se obtuvieron las gráficas de volumen en función del tiempo, que se muestran en las Figuras 5, 6 y 7 que se asemejan con las gráficas de voltaje en función del tiempo, para la carga y descarga del condensador de la Figura 4 y como constante de tiempo el Gasto cardíaco para el sistema biológico y RC para el sistema físico. Con todo esto, se logró la simulación de un proceso que permitió el control de las variables que intervienen, lo que establece la elaboración de estrategias que beneficien su desempeño. Es significativo emular un sistema biológico a través de un sistema físico, cuyas variables poseen la facilidad de control, lo que es impredecible en un sistema biológico, el cual tiene un comportamiento general pero que es adaptado a cada individuo en particular de acuerdo a características específicas intrínsecas además de no ser invasivo.

Tabla 4: Cálculo de errores e incertidumbres

	Tiempo	Etapa (pulso/s)		
	(s)	A	B	C
$\overline{x}$	0,4	1,0796	1,2611	1,0833
σ	0,273	0,016	0,122	0,014
EI	0,1	1	1	1
EE	0,273	0,016	0,122	0,014
Δx	0,186	1,016	1,122	1,014
UA	0,091	0,005	0,040	0,004
UB	0,1	1	1	1
UV	0,13	1	1	1
ΔVol (%)	—	2,90	3,70	2,92
Uvol (%)	—	2,03	2,35	2,03
$\overline{x}$vol (L)	—	0,028	0,03	0,101

A: Rápida ejección (sístole/vaciado) (VSF)
B: Relajación isovolumétrica (sístole/vaciado) (VSF)
C: isovolumétrico (diástole/llenado) (VDF)
EI: Error instrumental, EE: Error estadístico
Δx: Error absoluto
UA: Incertidumbre Tipo A, UB: Incertidumbre Tipo B
UV: Incertidumbre variable directa
ΔVol: Error absoluto del volumen
Uvol: Incertidumbre del volumen

En cuanto a la validación de las gráficas obtenidas, se procedió al cálculo de los errores e incertidumbre de las variables directas, tiempo y pulso/min y la variable indirecta, volumen ventricular los cuales se indican en la Tabla 4. Cabe mencionar que, el rango de valores del volumen ventricular está comprendido desde 0,05 hasta

Tabla 5: Comparación de resultados obtenidos

			Procesamiento digital		
Etapa	Volumen (mL)	Error (%)	Médico (mL)	Sistema (mL)	Error (%)
A	28,31	2,90	20,00	19,61	1,95
B	32,13	3,70	33,67	32,12	4,60
C	101,57	2,92	104,64	109,42	4,57

A: Rápida ejección(sístole/vaciado)(VSF)
B: Relajación isovolumetrica(sístole/vaciado) (VSF)
C: isovolumétrico(diástole/llenado) (VDF)

0,13 L; con un error aproximadamente del 3 %, lo que indica que el 97 % restante es acertado.

Estos resultados se comparan con los obtenidos al evaluar la función ventricular por el método Área_Longitud para el procesamiento digital de imágenes ventriculográficas y la manual por parte de personal médico. Además, de la analogía de las gráficas, otro elemento a considerar es el valor calculado del volumen ventricular, el cual se encuentra en el rango conocido o valor nominal, según la investigación mencionada [1]. Esto se muestra en la Tabla 5.

Además, se constató estadísticamente, si las variaciones observadas o calculadas (O) pueden atribuirse a las medidas tomadas o esperadas teóricamente (E) del volumen ventricular para cada tiempo, o a simples cuestiones del azar. Aplicando la prueba de hipótesis, por el método de chi cuadrado se obtiene para 8 grados de libertad y el 5 % de nivel de significación en la tabla basada en biometrika tables for statisticians, el valor de chi cuadrada o nivel crítico de 15,507 [9].

Para cada etapa del volumen ventricular los valores calculados de chi cuadrado indicados en las Tablas 6, 7 y 8 no sobrepasa este valor crítico y por lo tanto caen dentro del área de aceptación, esto quiere decir que la variación observada no tiene significancia por lo que es aceptada la hipótesis nula, la cual indica el propósito de la investigación en cuanto a la analogía entre las gráficas de volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador.

Tabla 6: Resultados obtenidos Chi cuadrado. Etapa A: Rápida ejección(sístole/vaciado)

Tiempo (s)	E	O	$(E-O)^2/E$
0	0,13	0,13	0
0,1	0,11	0,06	0,02273
0,2	0,04	0,03	0,0025
0,3	0,05	0,02	0,018
0,4	0,02	0,01	0,005
0,5	0,02	0	0,02
0,6	0,01	0	0,01
0,7	0,01	0	0,01
0,8	0,01	0	0,01
			χ^2 cal = 0,09823

E: esperadas teóricamente.
O: observadas o calculadas.

Tabla 7: Resultados obtenidos Chi cuadrado. Etapa B: relajación isovolumétrica(sístole/vaciado)

Tiempo (s)	E	O	$(E-O)^2/E$
0	0,13	0,13	0
0,1	0,11	0,07	0,01455
0,2	0,04	0,04	0
0,3	0,05	0,03	0,008
0,4	0,05	0,01	0,032
0,5	0,05	0,01	0,032
0,6	0,05	0	0,05
0,7	0,05	0	0,05
0,8	0,05	0	0,05
			χ^2 cal = 0,23655

E: esperadas teóricamente.
O: observadas o calculadas.

4. Conclusiones

El parámetro que se debe considerar para comparar las gráficas de dos sistemas, como es en este caso, el volumen ventricular y la carga y descarga de un condensador es la constante

Tabla 8: Resultados obtenidos Chi cuadrado. Etapa C: isovolumetrico(diástole/llenado)

Tiempo (s)	E	O	$(E-O)^2/E$
0	0,13	0	0,13
0,1	0,11	0,07	0,014545
0,2	0,06	0,1	0,026667
0,3	0,05	0,11	0,072
0,4	0,05	0,12	0,098
0,5	0,05	0,13	0,128
0,6	0,04	0,13	0,2025
0,7	0,11	0,13	0,003636
0,8	0,13	0,13	0
			χ^2 cal = 0,675348
		$v = 8$	$\chi^2_{0,05} = 15,507$

E: esperadas teóricamente.
O: observadas o calculadas.

de tiempo. Este dependerá de los factores que se consideren en el proceso ejecutado. En este sentido, se debe establecer el tipo de variables a comparar en relación a la incertidumbre intrínseca a ellas. Puede suceder que las variables sean aleatorias o determinísticas. En este caso, las variables del proceso de carga y descarga del condensador se escribieron en función de una expresión matemática explicita y obedecen a un modelo determinista.

Con respecto al volumen ventricular, esta trayectoria se puede considerar como perteneciente a un conjunto que puede estar perfectamente bien definida pero en casos futuros quizás no sean tan definidas y predecibles. Estas consideraciones son indispensables debido a la confiabilidad de sus resultados. Para los datos de frecuencia cardíaca considerados en la investigación, se ajustaron a lo esperado en el modelo matemático con sus respectivas variables.

5. Referencias

[1] V. Barrios, M. Montilla, and M. Cerrolaza, *Avances Recientes en Bioingenieria: Investigación y Tecnología Aplicada*. Caracas, Venezuela: Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 1997.

[2] J. A. F. Tresguerres, C. Ariznavarreta, C. Ariznavarreta Ruiz, J. Tamargo Menéndez, J. A. H. Tresguerres, M. Romano Pardo, V. Cachofeiro, F. Mora Teruel, D. Cardinali, V. Lahera Juliá, P. Gil-Loyzaga, and E. Escrich Escriche, *Fisiología Humana*, 4th ed. McGraw-Hill Interamericana, 2010.

[3] A. Cantor Rudas, "Nota técnica: Frecuencia cardiaca después de la exposición a longitudes de onda del espectro visible en áreas del cuerpo humano," *Revista Ingeniería UC*, vol. 23, no. 2, pp. 216–222, 2016.

[4] F. J. Bueche, F. M. Nicolau, and A. P. Contreras, *Física para estudiantes de ciencias e ingeniería*, 4th ed. McGraw-Hill Interamericana, 1991, vol. 1.

[5] K. Gómez Pérez and A. D'Alessandro Martínez, "Modelos de sistemas fisiológicos: Sistema cardiovascular," *Revista Facultad de Ingeniería UCV*, vol. 21, no. 3, pp. 145–161, 2006.

[6] L. Miliani de Souza and Z. González de Clamens, "Propuesta para la enseñanza del Laboratorio I de Física," Trabajo de ascenso, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1997.

[7] Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias, *Tecnología e Industrias Intermedias. Código de ética para la vida*, Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, República Bolivariana de Venezuela, 2016.

[8] R. Hernández Sampieri, M. d. P. Baptista Lucio, and C. Fernández Collado, *Metodología de la investigación*, 6th ed. McGraw-Hill, 2006.

[9] I. Miller and J. Freund, *Probabilidades y Estadística para Ingenieros*. México: Editorial Reverté, S.A., 2002.

Fe de errata

Resumen

Este apartado contiene correcciones solicitadas por los autores después que los artículos fueron publicados en la edición de Agosto 2015, Volumen 22(2).

1. En el artículo titulado: "Artículo Invitado. Control de las variables de salida de un clarificador de agua con condiciones variables de entrada mediante curvas de dosificación" siendo los autores del mismo: *T. García León, Gabriela Archila, María Ramírez, José García*. Revista Ingeniería UC, 22(2):7–20.

    - En la Tabla 13, pág. 17
      Dice: Tabla 13: Tabla ANOVA del Modelo Lineal para la variable respuesta *Turbidez*.

      Debe decir: Tabla 13: Tabla ANOVA del Modelo Cuadrático para la variable respuesta *Turbidez*.

Índice de materias

Symbols
índice de reproducción cromática general, 233

A
accesibilidad, 91
acero ASTM A131, 211
agua residual, 165
agua subterránea, 175
aguas de producción petrolera, 20
aguas residuales, 200
algoritmos criptográficos, 29
análisis por analogía, 237
análisis-Q, 29
aplicaciones, 118
arcilla, 20
autolavados, 200

C
caudales sintéticos, 54
centrales hidráulicas, 54
centrales térmicas, 54
coalescencia, 20
CommonKADS, 69
competencia digital, 78
conductividad eléctrica, 102
construction control, 84
criterio de Nyquist, 224
Cuenca Ramis, 189
curva de intensidad de luz, 233

D
derivados, 118
desarrollo sostenible, 91
DQO, 150

E
elongación, 102
equilibrio, 175
esfuerzo último, 102
esfuerzos residuales, 211
estabilidad paramétrica, 224
evaluación no invasiva, 41

F
FCE, 69
filtros, 20
flujo luminoso, 233
formación de agentes móviles, 224
formación de múltiples agentes, 224
frecuencia Cardíaca, 237

G
GC-MS, 150
GR4J, 189

H
HBV, 189
HPLC, 150
humedecimiento parcial, 136

I
intercambio de información, 224

J
Jiménez, Jesús, 78

L
Lámpara de filamento LED, 233
lámpara incandescente, 233
Latex, 78
lodo rojo, 150
lubricantes, 200

M
Matute, Kelvyn, 102
meta-modelo cibernético, 29
microestructura, 102
modelación hidrológica, 189
Modelo basado en agentes (MBA), 175
movilidad sostenible, 91

N
número de pasadas, 211

O
OODA, 69

P
PARMA, 54
PERSEO, 54
plan estratégico, 78
polisacárido, 118
preferencias de usuario, 6
proceso Fenton, 165
procesos de oxidación avanzada, 150
propiedades mecánicas, 211

Q
quitina, 118
quitosano, 118

R
recocido, 102
red ciclovías, 91
redes de sensores, 69
redes sociales, 6
rendimiento académico, 78
rendimiento de papa, 136
riego parcial, 136
riego por goteo, 136
rodamientos, 41
RS-MINERVE, 189

S
sistemas de recomendación, 6
SOCONT, 189
soldadura GMAW, 211
sustancia recalcitrante, 165

T
tecnología semántica, 6
transporte, 91

V
vehículos aéreos no tripulados, 224
vibraciones, 41
volumen ventricular, 237

Subjects index

A
academic performance, 78
accessibility, 91
advanced oxidation processes, 150
Agent Base Model (ABM), 175
analysis by analogy, 237
annealing, 102
applications, 118
ASTM A131 steel, 211

B
balancing, 175
bearings, 41

C
cardiac output, 237
carwashes, 200
CDO, 150
chitin, 118
chitosan, 118
clay, 20
coalescence, 20
CommonKADS, 69
construction control, 84
cryptography algorithms, 29
cybernetic meta-model, 29
cycle network, 91

D
derivatives, 118
digital competition, 78
drip irrigation, 136

E
electrical conductivity, 102
ELF, 69
elongation, 102

F
Fenton process, 165
filters, 20

G
GC-MS, 150
GR4J, 189
grid computing, 69
groundwater, 175

H
HBV, 189
heart rate, 237
HPLC, 150
hydrological modeling, 189
hydropower, 54

I
incandescent lamp, 233
information exchange, 224

L
Latex, 78
LED filament lamp, 233
light intensity curve, 233
lubricants, 200
luminous flux, 233

M
mechanical properties, 211
microstructure, 102
mobile agent formation, 224
multi-agent formation, 224

N
non invasive assesment, 41
number of passes, 211
Nyquist criterion, 224

O
oils production water, 20
OODA, 69

P
parametric stability, 224
PARMA, 54
partial irrigation, 136
partial wetting, 136
PERSEO, 54
polysaccharide, 118

potato yield, 136

Q
Q-analysis, 29

R
Ramis basin, 189
recalcitrant substance, 165
recommender systems, 6
red mud, 150
redeployment of industrial facilities, 84
redevelopment of industrial areas, 84
residual stresses, 211
residual water, 165
RS-MINERVE, 189

S
scientific and technical renovation substantiation, 84
semantic technology, 6
sensor networks, 69
social networks, 6
SOCONT, 189
strategic plan, 78
sustainable development, 91
sustainable mobility, 91
synthetic flows, 54

T
thermoelectric power, 54
transport, 91

U
ultimate effort, 102
unmanned aerial vehicle (UAV), 224
urban development, 84
user preferences, 6

V
ventricular volume, 237
vibrations, 41

W
wastewaters, 200
welding GMAW, 211

Índice de autores (*Author index*)

A
Albornoz, Andrés, 41
Aleida Cantor-Rudas, 237
Alied Romero–Serrano, 118
Almarza-Morales, Ángel, 4
Araghinejad, Shahab, 175
Aref, Mohammad, 29

B
Babazadeh, Hossain, 175
Bakhtiari, Sedighe, 69
Bullón, Johnny, 20

C
Cardenas-Vásquez, Ernesto, 165
Centeno-Bordones, Guillermo, 150

D
Díaz, Albenis, 211

F
Farias, Betty, 91
Fesharaki, Mehdi N., 69
Flores, Enrique, 41

G
García Sánchez, Francisco, 6
García, José V., 150
Guerra, Sergio, 211
Guevara-Pérez, Edilberto, 54, 136

J
Jiménez, Ygmar, 150
Juan Pereira, 118

K
Khadem-zadeh, Ahmad, 69
Kuzichkin, O. R., 224

L
López, Erwin, 41
Lapidus, Azariy A., 84
Lujano, Apolinario, 189
Lujano, Efrain, 189
Lujano, Rene, 189

M
Medina-Valderrama, Carlos, 165
Mejía-Marcacuzco, Abel, 54
Mejía-Marcacuzco, Jesús, 136
Mikaeva, S. A., 233
Mousalli, Victoria, 20

N
Natividad-Toribio, Piero, 136
Norouzzadeh-GilMolk, Ali, 29

O
Ordoñez, Joan, 78
Orrego-Zapo, Salvador, 165
Ortiz, Carlos, 200

P
Pazahr, Ali, 6
Pernía, Leidy, 150
Prato, Jesús David, 20

R
Rahmani, Hamid, 175
Ramazani-Khorshiddoust, Reza, 29
Razuri-Ramírez, Luis, 136
Rennola, Leonardo, 20
Román, Yanitza, 78
Romero, Jorge, 41

S
Sánchez-Delgado, Miguel, 136
Salazar, Franklin, 20
Salazar, Leonel, 102
Samper Zapater, José Javier, 6
Sarango-Julca, Douglas, 54
saremi, Ali, 175
Sidorovas, Luis, 102
Sosa, Jesús David, 189
Surzhik, D. I., 224

T
Torres, Carmelo, 211

U
Uriarte-Tirado, Wilmer, 165

V
Vasilyev, G. S., 224
Villalta, Maritza, 211
Villegas, Isandra, 91

Z
Zheleznikova, O. E., 233
Zhuravleva, Yu. A., 233

Apéndices

Línea editorial

Misión científica

Revista Ingeniería UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista Ingeniería UC es la difusión de trabajos científicos tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista Ingeniería UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por el Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

Cobertura temática

Revista Ingeniería UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la carta de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

Foro de Revista Ingeniería UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro cubre las comunidades a nivel local, Universidad de Carabobo y sus estados de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como a nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista Ingeniería UC es publicada cada cuatro meses.

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Engineering Faculty of Carabobo University.

The Revista Ingeniería UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista Ingeniería UC is subscrited to Research Direction of Engineering Faculty. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

Thematic coverage

Revista Ingeniería UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

Revista Ingeniería UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, University of Carabobo and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista Ingeniería UC is published every four months.

Políticas de ética y publicación

Introducción

Revista Ingeniería UC, como publicación científica cuatrimestral incluye tres números (Abril-Agosto-Diciembre) por cada volumen en un año, alcanza la generación continua de contenidos como principal organismo de difusión académica, científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El idioma principal de la revista es el español, manejando el inglés como segundo idioma y todos los artículos incluyen el título, resumen y las palabras clave en ambos.

Comprometidos en mantener los más altos estándares éticos, se efectúan acciones en contra de cualquier práctica anti-ética o por negligencia profesional. El plagio está estrictamente prohibido y nuestros autores y demás investigadores expresan formalmente que sus trabajos son originales, inéditos, y no están siendo sometidos a proceso de arbitraje en otras revistas, por otra parte, queda expresamente prohibida la copia o el plagio, parcial o en su totalidad, de otras obras. Todo trabajo para ser publicado cuenta con la exigencia de manera explícita a sus autores de la normativa ética de la Revista que se plasma en una *Carta de Compromiso*.

Prácticas anti-éticas y negligencia profesional

Por considerar tanto aspectos científicos como tecnológicos, se debe tomar en cuenta la necesidad de velar por la veracidad de toda información suministrada incluyendo datos técnicos, diagramas, tablas y figuras, diseños experimentales, metodologías, entre otros, siendo de vital importancia la cita a las referencias respectivas indicando con los estándares habituales cuando la información es tomada textualmente. Se consideran como faltas graves que conllevan un proceso disciplinario sancionatorio las siguientes:

a) **Copias o plagio**: presentar datos o ideas como propios, de manera parcial o en su totalidad, provenientes de otras obras.

b) **Falsificación o adulteración**: la modificación y cambio de datos presentados, omitir información de forma tal que la investigación no esté completamente presentada.

c) **Presentación de datos no verídicos**: fabricación, manipulación y presentación de información que no se desprende de datos reales derivados de la investigación.

d) **Segmentación de la investigación**: implica la fragmentación de un estudio en diversas partes con la intención de generar más de un producto con el mismo trabajo para su publicación, incluso en diferentes revistas, sin reconocer la fuente original.

e) **Alteración de autor y coautores**: la inclusión de algún miembro que no ha participado en la investigación, así como la exclusión de alguno que si lo ha realizado. De igual forma, cualquier modificación relacionada con cambios en autores y coautores, debe estar debidamente justificada; luego de finalizado el proceso de edición no será considerada.

f) **Alteración del proceso de arbitraje**: cualquier intento que afecte el proceso de arbitraje por pares a doble ciego. Se prohíbe de manera explícita la comunicación entre un árbitro y los autores del artículo.

Proceso de revisión y arbitraje

Los autores serán guiados a través de cuatro fases que conllevan la revisión preliminar, el proceso de arbitraje por pares doble ciego, el proceso de edición y montaje y por último, corrección de redacción y estilo. El contenido completo de todos los manuscritos será sometido a un proceso

de revisión objetiva por parte de expertos en el área, quienes siguiendo para ello las pautas del Formato de Evaluación comunicarán los resultados obtenidos, permitiendo al Editor–Jefe conocer las recomendaciones formuladas y el veredicto respectivo. Además, el proceso de revisión es de carácter estrictamente confidencial, y los revisores no deben tener conflicto de intereses.

La revisión de los manuscritos permitirá evaluar la calidad técnica de estos en base a su originalidad y presencia de avances significativos en el campo de la ingeniería y ciencias afines, atendiendo a la pertinencia del contenido, el enfoque metodológico, los hallazgos obtenidos y a las referencias que, con respecto a contribuciones anteriores, se presentan. Tomando como premisa la debida organización de la estructura del manuscrito y el cumplimiento de las normas de presentación.

De acuerdo a los resultados de la revisión, se propone al Editor–Jefe:

- Publicación, sin cambios.
- Publicación, después de cambios menores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes respectivos de acuerdo a la evaluación.
- Publicación, después de cambios mayores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes y modificaciones requeridas según los resultados de la evaluación, sujeto a una nueva revisión.
- Publicación de una versión corta del manuscrito como Nota Técnica, en cuyo caso los autores serán notificados y ejecutarán las modificaciones a que tuviera lugar.
- Publicación en otra revista, en cuyo caso se realizará la recomendación a los autores.
- Rechazo del manuscrito para su publicación, en cuyo caso no se recibirán nuevas versiones.

Una vez concluida la revisión, el manuscrito se someterá al proceso de edición, en donde con la intención de asegurar la calidad de la publicación se podrá solicitar la condensación, supresión o incorporación de tablas, figuras, y ecuaciones, teniendo en cuenta que el comité editorial se reserva el derecho de efectuar las modificaciones pertinentes sin afectar el contenido, así como también la potestad de decidir respecto a su publicación si los autores no responden satisfactoriamente a las observaciones planteadas. El manuscrito editado, será remitido a los autores para su aprobación.

De la responsabilidad de los autores

Los autores que envían sus manuscritos para su publicación en Revista Ingeniería UC, deben someterlos a un proceso de revisión y arbitraje por pares doble ciego, y están obligados a:

- Firmar la *Carta de Compromiso*, manifestando que el contenido del trabajo enviado a la revista es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado ni redundante, además no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún otro medio de difusión, y por último que los datos presentados son originales y verídicos. Adicionalmente, el autor y los coautores ceden los derechos patrimoniales a la Revista Ingeniería UC, pero mantienen sus derechos como autores intelectuales.
- Deben evitarse o reconocerse los envíos anteriores del manuscrito a otras revistas o publicaciones, en el caso de haber sido enviado es necesario la presentación de una comunicación de la otra publicación donde se deje sin efecto el proceso de arbitraje y las motivaciones consideradas.
- Respecto a materiales/datos citados o utilizados de otras investigaciones deben documentarse cuidadosamente y citarse como referencia e indicar cuando son tomados textualmente. No es permitida la duplicación de trabajos anteriores.
- Especificar de manera clara la información relativa a las fuentes de financiamiento para el desarrollo de la investigación.

- Responder de manera oportuna a las comunicaciones que tenga lugar con el Comité Editorial.
- Cuando un error sea detectado, el autor está obligado a retractarse y efectuar las correcciones pertinentes.
- Respecto a la identificación de autores, se debe indicar el nombre tanto del autor como de los coautores, que hayan contribuido significativamente en la investigación y que estén involucrados con esta, evitando incluir personas que no estén vinculadas a la misma. Siendo además miembros de una institución de educación superior o de una estructura de investigación reconocida, suministrando información detallada relacionada con su filiación, correo electrónico de contacto y cualquier otro elemento que permita su identificación.

De la responsabilidad de los revisores–árbitros

Una vez recibido el manuscrito, acompañado de las Normas de Publicación y el Formato de Evaluación previsto por Revista Ingeniería UC, los árbitros están en la obligación de informar de manera expedita, si se acepta o rechaza la revisión del mismo explicando los motivos. En el caso de que los árbitros tengan interés intelectual o material relacionado al manuscrito bajo revisión, estos deberán inhibirse de manera voluntaria evitando así Conflicto de Intereses.

Los árbitros deberán rechazar la revisión de manuscritos, cuando estos estén fuera de su área de experticia o de especialización técnica y científica. Por otro lado, los árbitros o revisores deben completar debidamente el Formato de Evaluación previsto así como también realizar las observaciones que considere pertinentes sobre el manuscrito evaluado, lo cual incluye todas aquellas propuestas tendentes a mejorar cuando sea el caso aspectos metodológicos, la presentación y análisis de resultados y la incorporación de investigaciones de referentes de importancia que hayan sido omitidos por los autores o que debieran ser tomados en consideración, tomando en cuenta que el envío de dicha información al Editor–Jefe es de carácter obligatorio y estrictamente confidencial.

De la responsabilidad de los miembros del Comité Editorial

El Editor–Jefe de Revista Ingeniería UC, realizará una revisión preliminar al recibir el manuscrito, atendiendo a las características de la línea editorial correspondiente. Una vez superada dicha revisión, se procederá a proponer a los revisores o árbitros de acuerdo al área de conocimiento.

El Editor–Jefe será el responsable de enviar las comunicaciones respectivas a los autores, con respecto a las observaciones emitidas por los árbitros o revisores, y conducir el proceso para que se tomen medidas correctivas. Así mismo, decidirá sobre la aceptación o no del manuscrito en atención a los comentarios de los árbitros o revisores designados. El Comité Editorial tratará la información relacionada con los artículos con criterios de estricta confidencialidad.

El Comité Editorial velará por el cumplimiento de las prácticas de ética. Además realiza un esfuerzo por identificar e impedir la publicación de artículos que involucren malas conductas durante la investigación. De igual manera, se debe tratar cualquier tipo de acusación o señalamiento de manera responsable y dar inicio al proceso de sustanciación del expediente con las averiguaciones a las que se tenga lugar y se decidirá si es necesario un proceso disciplinario que conlleva:

- Amonestación: se envía a los autores una carta con las conclusiones del proceso disciplinario.
- Artículo retractado: se incluirá una carta de exposición de motivos con las conclusiones del proceso disciplinario, y el artículo será marcado con una nota de retractación.
- Suspensión: se le notifica a los autores que no serán recibidos manuscritos para su publicación mientras dure la sanción correspondiente.

.

El Comité Editorial es responsable de la publicación de cualquier nota, crítica razonable, fe de errata o disculpas con respecto a los manuscritos publicados en números anteriores.

Preservación digital

Revista Ingeniería UC utiliza para la preservación digital de sus artículos, el resguardo con archivo comprimido en formato LaTeX, además a través de Marcalyc 2.0 realiza el marcaje obteniendo archivo XML según estándar JATS.

Licencia Creative Commons

Licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obras derivadas 4.0 Internacional



Ethics and Publication Policies

Introduction

Revista Ingeniería UC, as a quarterly scientific publication includes three issues (April-August - December) for each volume in a year, reaches the continuous generation of contents as principal media of diffusion academic, scientific and technological of the Faculty of Engineering at Carabobo University. The primary language of the journal is Spanish, managing English as a second language, all articles include title, abstract and keywords in both.

Also, committed to maintain the highest ethical standards, are performed actions against any anti-ethics practice or professional negligence. Plagiarism is strictly forbidden and our authors and other researchers must express formally that their manuscripts are original, unpublished, and not have been submitted to arbitration process in other journals simultaneously. In the other hand, is expressly forbidden the copying or plagiarism, partially or in its entirety, of other works. An article to be published has as requirement knowledge by the authors of the ethic policies, that are reflected in the signing of "*Compromise Letter*".

Anti-ethics practices and professional negligence

Due scientific and technological aspects, Revista Ingeniería UC needs to ensure the veracity of all information provided including technical data, diagrams, tables and figures, experimental designs, methodologies, among others, being vital the cite of the respective references indicating with the usual standards when the information is taken verbatim. Considering as serious faults involving a disciplinary process:

a) **Copy or plagiarism**: present data or ideas as own, partially or entirety, from other works.

b) **Falsification or adulteration**: modification or change presented data. Omitting information in such way that the investigation is not completely presented.

c) **Presentation of untrue data**: manufacturing and handling of presented information that does not arise from real data derived from research.

d) **Research segmentation**: fragmentation of a study in different parts with the intention of generating more than one product with the same work for publication, even in different journals, without recognizing original source.

e) **Alteration of author and coauthors**: Exclusion of members participating in the investigation or inclusion of members without a direct role. Also, any alteration of author–coauthors, must be justified and will not be considered after has been closed edition process.

f) **Alteration of arbitration process**: any attempt that affects the arbitration process (double blind peer-review). Communication between an arbitrator and authors of manuscript, is strictly prohibited.

Review process and arbitration

The authors will be guided through four phases including a preliminary review, arbitration process (peer–review, double blind), final edition and assembly and correction of style and redaction. All the content will be sent to an objective reviewing process by experts in knowledge field, who following the guidelines of the Evaluation Format will communicate the results obtained, allowing the Editor–Chief to know the recommendations made and the respective verdict. In addition, the review

process is strictly confidential, and the reviewers should not have interest conflict.

The revision of the manuscripts will allow to evaluate technical quality based on originality and presence of significant advances in the field of engineering and related sciences, considering the relevance of content, methodological approach and findings obtained and references to previous contributions. Taking as a premise organization of the structure of manuscript and compliance with presentation rules.

Based on review process results, is proposed to the Editor–Chief:

- Publication, without changes.
- Publication, after minor changes, the authors are committed to make the respective adjustments according to the evaluation.
- Publication, after major changes, the authors are committed to make the adjustments and modifications required according to the evaluation results, subject to a new revision.
- Publication of a short version of the manuscript as a emphTech Note, in which case the authors will be notified and will execute the modifications that may take place.
- Publication in another journal, in which case the recommendation to the authors will be made.
- Rejection of the manuscript for publication, in which case new versions will not be received.

Once the review is completed, the manuscript will be elevated to the editing process, where with the intention of ensuring the quality of the publication, may be requested condensation, deletion or incorporation of tables, figures, and equations, considering that the editorial committee could make relevant modifications without affecting the content, as well as would decide about publication if the authors do not respond satisfactorily to the comments made. The edited manuscript will be submitted to the authors for approval.

About the responsibility of authors

Authors who submit their manuscripts for publication in Revista Ingeniería UC, are in knowledge that them will be subjected to a double-blind peer review and arbitration process, and are obliged to:

- Sign the "*Compromise Letter*", stating that the content of manuscript sent to the journal is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated or redundant, it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by another means of diffusion, and finally that the data presented are original and true. Furthermore, the author and coauthors yield patrimonial rights to the journal, but maintain their rights as intellectual authors.
- Previous submits of the manuscript to other journals should be avoided or recognized, and it is necessary to present a communication from the other journal where the arbitration process are left without effect and the motivations considered.
- Should be carefully documented and cited as references, all materials/data used from other research, indicating when they are taken verbatim. Duplication of previous works is not allowed.
- The authors must clearly specify the information related to sources of financing for the development of research.
- Authors should respond timely all communications of Editorial Committee.
- When an error is detected, the author is obliged to retract and make the appropriate corrections.
- Respect to the identification of authors, should be indicated the name of author and coauthors, that have significantly contributed on the research and have been involved in its development, avoiding to include persons who

are not linked to it. The authors and coauthors must be members of a higher education institution or a recognized research structure, providing detailed information related to their filiation, contact email and any other element that allows their identification.

About the responsibility of reviewers – arbitrators

Once upon the manuscript is received, with the Normative of Publication and Evaluation Format of Revista Ingeniería UC, reviewers are obligated to inform immediately, if accept or refuse review the document and must explain the motives about it. In the event that arbitrators have intellectual or material interest related to the manuscript under review, must be voluntarily inhibited them, thus avoiding Conflict of Interest.

The reviewers must reject the revision of manuscripts, when they are outside their area of expertise or technical and scientific specialization. In other hand, the arbitrators or reviewers must complete the expected Evaluation Form, as well as make the observations that they consider pertinent about the manuscript evaluated, which includes, as the case may be, all those proposals aimed at improving the presentation and analysis of results, and the incorporation of investigations of relevant referents, taking into account that the sending of information to the Editor–Chief is mandatory and strictly confidential.

About the responsibility of Editorial Committee members

The Editor–Chief of Revista Ingeniería UC, will carry out a preliminary review upon receiving the manuscript, considering the characteristics of the corresponding editorial line. Once this revision has been completed, it will proceed to propose the reviewers or arbitrators according to the area of knowledge.

The Editor–Chief will be responsible for sending the respective communications to the authors, with respect to the observations issued by the reviewers or arbitrators, and conduct the process to corrective measures are taken. Likewise, it will decide on the acceptance or not of the manuscript in response to the comments of the appointed arbitrators or reviewers. The Editorial Committee will manage the information related to the articles with confidentiality criteria.

The Editorial Committee will ensure compliance with ethical practices. In addition, the editorial committee makes an effort to identify and prevent the publication of articles that involve misconduct during the investigation. At the same time, any type of accusation must be treated responsibly, initiate the inquiries for the substantiation file, through which it will be decided if a disciplinary process is necessary, that implicates:

- Admonish: a letter with the conclusions of the disciplinary process is sent to the authors.
- Retracted article: it will include a letter of explanation of the reasons with the conclusions of the disciplinary process, and the article will be marked with a retraction note.
- Suspension: the authors are notified that manuscripts will not be received for publication during the corresponding sanction.

The Editorial Committee is responsible for the publication of any note, reasonable criticism, erratum or apology regarding the manuscripts published in previous issues.

Digital preservation

Revista Ingeniería UC uses to digital preservation of its articles, saving zip file with LaTeXformat, also via Marcalyc 2.0 makes marked file generating XML JATS file.

License Creative Commons

License de Creative Commons Attribution – No Commercial – No derivatives. 4.0 International



Normas para la presentación de artículos

Generales

Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias afines.

Tipos de trabajos

a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.

b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.

c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.

d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.

e Cartas al editor.

f Artículos de tendencia tecnológica, estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo de alta utilidad en el campo industrial.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor está comprometido formalmente con que el trabajo consignado es original e inédito, de igual manera manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y acepta que sea sometido al proceso de arbitraje.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto (CD) o en su defecto enviarse por vía electrónica al correo de la revista revistaing@uc.edu.ve.

Los trabajos en LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras pueden ser en escalas de grises claros o a color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante "negritas".

Toda tabla y/o figura deben ser numerada en arábigo (1, 2, . . .), citada y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: "en la Figura 3", "en la Tabla 2", por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5 cm.

No es estilo de la revista frases como: "en la Figura siguiente" o en la "Tabla anterior"

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada.

2. Introducción.
3. Metodología o Desarrollo de la investigación.
4. Análisis y discusión de resultados.
5. Conclusiones.
6. Referencias.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) a cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Engelbrecht [11], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [11], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en LaTeX se usará el estilo de bibliografía "IEEEtran".

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.
- Capítulos de libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Inicial del nombre y Apellido).
- "Título".
- *Nombre de la revista*,
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities," *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, lugar de publicación : editorial, año de publicación.
Por ejemplo:

[2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

En caso de colección editada: Autor(es), "Título", en *título*, Editor(es), año, Eds., editorial, año de publicación, volumen, capítulo, número de páginas.
Por ejemplo:

[3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, "The Semantic Web – ISWC 2018," in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

[4] D. Nilesh and M. Nagle, "The new cryptography algorithm with high throughput," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas. Adicionalmente, el uso de coma (,) como separador decimal

Notas Finales

Los artículos serán sometidos al proceso de arbitraje, doble ciego por pares, previo a su publicación. La Revista Ingeniería UC como órgano de difusión y divulgación de las actividades científicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo siempre se ha pronunciado por un Acceso Abierto No comercial (AANC), siendo una institución sin fines de lucro.

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will considerer for publication original and unpublished contributions in engineering, in particular areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

Type of Manuscripts:

a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.

b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.

c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).

d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.

e Letter to Editor.

f Technological trend articles, medium and long-term R & D + i prospective studies of high utility in the industrial field.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the author is formally committed to the consigned paper is original and unpublished, he manifest his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

Article style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using LaTeX or in Microsoft WORD.

The Microsoft WORD works must employ font of Times family, to be stored in compact disk (CD) or send electronically by email to revistaing@uc.edu.ve.

The works in LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in png, eps or pdf.

The figures can be in gray scale, or color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a apart file called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of "bold type". Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, . . .) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: "In Figure 3", "in Table 2", for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5 cm.

The writing sequence for the articles shall be as following:

1. Title page.
2. Introduction.
3. Methodology or Research development.
4. Analysis and Discussion of results.
5. Conclusions.
6. References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).

- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200 words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.
- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Engelbrecht [11], or simply [11] with no author name.

For LaTeX work will use bibliography style "IEEEtran".

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), "full title", *journal*, volume, number, pages and year of publication. For example:

[1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities," *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, place: publisher and year of publication should be included. For example:

[2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), "title," in: *booktitle*, Editor(s) (in caps and lower case), publisher, year, volume, chapter and pages. For example:

[3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, "The Semantic Web – ISWC 2018," in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

[4] D. Nilesh and M. Nagle, "The new cryptography algorithm with high throughput," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations). Aditionaly, use comma(,) as decimal separator.

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Revista Ingeniería UC as an organ of diffusion and divulgation of scientific activities of Engineering Faculty at Carabobo University, has always been pronounced for Open Access Non-Commercial policy, being a non-profit institution.

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista Ingeniería UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantienen sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director, Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and coauthors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indizada en:

Revista Ingeniería UC, ISSN: 1316–6832, Online ISSN: 2610-8240.

Universidad de Carabobo
Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri

Decano

Prof.^{a} Carmen Guédez
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof^a. Ledy Guerra
Directora Esc, Ing. Eléctrica

Prof^a. Vanessa Hurtado
Directora Esc. Ing. Mecánica

Prof^a. Ixmit López
Directora Esc. Ing. Química

Prof. Ángel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción Intelectual

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán
Director del Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado

Prof. Tony Espinoza
Asistente al Decano

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Prof.^{a} María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curricular

Prof.^{a} Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof. David E. Duarte G.
Director de Tecnologías de la Información y Comunicación

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Prof.^{a} Lissette Jiménez
Directora de Postgrado

Prof. Luis E. Di Stefano
Director de Administración

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones Químicas

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de Imágenes

Prof.^{a} Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Donato Magarelli
Director de Biblioteca

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR–Matriz de información para el análisis de revistas; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ Directory of Open Access Journals

Se publica cada cuatro meses Abril, Agosto, Diciembre. Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula–Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo–e: revistaing@uc.edu.ve

Correo–e: revistaing@gmail.com

Página Web: http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/; https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707/

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832
Mayo–Agosto 2020, Volumen 27
Número 2

Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;
Actualidad Iberoameticana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México); Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters;
MIAR–Matriz de información para el análsis de revistas;
RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico;
DOAJ Directory of Open Access Journals.

Contenido general: páginas V y IX.

Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela